



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Teräsrakenteiden toiminnallisen palomitoituksen prosessi - tapaustutkimus

Ville Liimatta

Ohjaajat: Matti Kangaspuoskari, Antti Niemi

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Diplomityö

Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Teräsrakenteiden toiminnallisen palomitoituksen prosessi – tapaustutkimus

Ville Liimatta

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Diplomityö 2020, 104 s. + 2 s. liitteet

Työn ohjaajat yliopistolla: Yliopisto-opettaja Matti Kangaspuoskari ja Yliopistotutkija Antti Niemi

Työn kirjallisuustutkimusosassa etsitään tietoa toiminnallisesta palomitoituksesta säädöksien ja standardien näkökulmasta, jotka velvoittavat tai opastavat menetelmien käyttöön. Kantavien teräsrakenteiden paloturvallisuussuunnittelu jakautuu karkeasti kahteen osaan, joista taulukkomitoitus on perinteisesti käytetty tapa suunnitella, mutta tämän työn tavoitteena on lisätä tietoutta ja osaamista toiminnalliseen palomitoitukseen, joten oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun menetelmiä ja niitä hyödyntäviä ohjelmia on käsitelty tässä työssä. Koska toiminnallinen palomitoitus eli oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ei ole yleisimmin käytetty tapa, on pyritty parantamaan myös yhteistyötä rakennushankkeeseen liittyvien osapuolten välillä.

Case-esimerkissä käytetään toiminnallista palomitoitusta Ouluhallin laajennuksen liikuntasalin teräsristikoiden suunnitteluun ja tutkitaan, voitaisiinko palosuojamaalaus jättää pois teräsristikoista selvittämällä kohteelle todenmukaiset palokuormat ja mitoituspalojen myötä lämpötilan kehittyminen tarkasteltavassa tilassa palosimulointiohjelmistolla. Suunnitteluprosessin kehittämiseksi on esitetty käytettäväksi esitietopaperia, mikä käydään läpi alueen pelastusviranomaisen kanssa ennen PyroSIM ja FDS-ohjelmilla suoritettavaa palosimulointia. Simulointien jälkeen tehdään erikseen suunnitteluosa ja lausunto, jotka pohjautuvat esitietopaperiin.

Diplomityöhön on koottu paloteknisen suunnittelun eri vaiheet lähtien liikkeelle toiminnallisesta palomitoituksesta säädöksistä ja päättyen käytännön suunnittelun esimerkkitapaukseen. Oletettuun palonkehitykseen perustuvaa toiminnallista

mitoitustapaa voitaisiin käyttää nykyistä enemmän tunnistamalla tiloja, joissa se on hyödynnettävissä. Rakennushankkeen eri osapuolet eivät välttämättä tunne toiminnallista mitoitustapaa yhtä hyvin kuin taulukkomitoitusta ja siksi aiheesta kertovan työn tarkoituksena on lisätä tietoutta ja osaamista toiminnalliseen palomitoitukseen, minkä lisäksi se selkeyttää rakennushankkeen osapuolien yhteistyötä.

Asiasanat: paloturvallisuus, toiminnallinen palomitoitus, oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu, rakennushanke

ABSTRACT

Process of the performance-based fire safety design – case study

Ville Liimatta

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2020, 104 pp. + 2 s. Appendixes

Supervisor(s) at the university: Matti Kangaspuoskari and Antti Niemi

This thesis starts with a literature review of acts and standards of the performance-based fire safety design which together with methods plays a binding and informative role of the thesis. The most common way to design structures in terms of fire safety is to use tables from regulation 848/2017 by the Ministry of the environment. In this paper the main goal is to raise awareness and study what kind of methods or softwares are used in less well-known performance-based fire design. Another goal is to find ways to improve cooperation among the people involved in the construction project.

Case study is made from the extension of the sports hall in Ouluhalli. Performance-based fire design is used to find out if the fire protection coating is needed in steel structures of the hall. Therefore, real fire incidents are simulated to find out how the temperature develops in the hall. For the development of the design process, it is crucial to document before simulations that designer has discussed about the possibly fire incidents with an authoritative of the rescue department. After simulations have been made with the PyroSIM and FDS-programs, the design must be documented based on the assumptions of the earlier document created before simulations.

This paper is containing a comprehensive study from the basis of the performance-based fire safety design all the way to the real-life case example. By recognizing the possible spaces suitable for this method, it could be used in a much larger scale that it is at the moment. It requires better knowledge about the topic and therefore this study is done to make sure that all the people who are in the construction project know that this kind of method is available.

Keywords: fire safety, performance-based fire safety design, steel structures, construction project

ALKUSANAT

Diplomityö on valmistunut Teräsrakenneyhdistyksen Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun, lyhyesti ALOHA-hankkeen sivutuotteena. Hankkeeseen valmistunut osatehtävä 2 raportti on tiivistetty teos tästä diplomityöstä. Kiitos Teräsrakenneyhdistykselle mielenkiintoisesta hankkeesta, joka saatiin maaliin tammikuussa 2020 Tampereella pidetyssä päätösseminaarissa. Kiitos myös kaikille hankkeeseen osallistuville yrityksille, joita oli kaiken kaikkiaan 12. Kiitokset Janne Tähtikunnakselle, Mikko Salmiselle, Suvi Papulalle ja Teemu Tiaiselle kommenteista ja hankkeen läpiviennistä.

Haluan kiittää myös Ramboll Finland Oy:stä Juho Ruotasta ja Marko Hämäläistä avusta hankkeen aikana erityisesti esimerkkikohteen palosimulointiohjelmistojen käytön avustamisessa. Esimerkkikohteen mitoituspaloista kävimme keskusteluja Oulu-Koillismaan palotarkastusinsinööri Jarkko Heikkisen kanssa, jota haluan kiittää osallistumisesta siltä osin diplomityöhöni. Jarkko oli mukana keskusteluissa toiminnallisen mitoitustavan käytöstä rakennushankkeessa yhdessä Jouko Lammisen kanssa, jota haluan lisäksi kiittää osallistumisesta työhöni. Kiitokset myös Oulun yliopistolle ja työn ohjaajille Matti Kangaspuoskarille ja Antti Niemelle tuesta diplomityön aikana.

Iso kiitos Mikko Malaskalle osallistumisesta työn tarkastukseen, hankkeen aikana menehtyneen Jyri Outisen tilalle. Olen kiitollinen, että sain työskennellä paloturvallisuusalan eteen paljon työtä tehneen ja Ramboll Finland Oy:llä johtavan asiantuntijan roolissa työskennelleen tekniikan tohtori Jyri Outisen kanssa.

Kiitokset myös perhe, avovaimo ja ystävät, jotka ovat osoittaneet mielenkiintoa työtäni kohtaan sekä tukeneet tässä projektissa.

Oulu, 3.3.2020



Ville Liimatta

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	14
ABSTRACT	16
ALKUSANAT	17
MERKINNÄT JA LYHENTEET	21
1 JOHDANTO	13
2 PALOTURVALLISUUDEN SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT	15
2.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki	15
2.2 Pelastuslaki	17
2.3 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta	18
2.4 Standardit	22
2.4.1 SFS-EN 1990	24
2.4.2 SFS-EN 1991-1-2	26
2.4.3 SFS-EN 1993-1-1	28
2.4.4 SFS-EN 1993-1-2	29
3 TOIMINNALLISESSA PALOMITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT	30
3.1 Yleistä	30
3.2 Nimelliset lämpötila-aikakäyrät	31
3.2.1 Standardipalon lämpötila-aikakäyrä	32
3.2.2 Ulkopuolisen palon käyrä	32
3.2.3 Hiilivetykäyrä	33
3.3 Palotehon määrittäminen	34
3.3.1 Palotehon kehittyminen	34
3.3.2 Polttoaineen rajoittama palo	36
3.3.3 Jäähtymisvaihe	37
3.4 Paikallisen palon mallit	38
3.5 Vyöhykemallit	40
3.5.1 Yleistä	40
3.5.2 OZone	41
3.5.3 ELEFIR-EN	42
3.6 Palosimulointi	43
3.6.1 PyroSim / FDS	43
3.6.2 SAFIR	45
3.7 Lämmönsiirtyminen teräsrakenteisiin	45

3.7.1 Teräs	45
3.7.2 Lämmönsiirtyminen.....	46
3.7.3 Laskelmat.....	47
3.7.4 Liitokset	51
3.8 Palonsuojausmenetelmät	53
3.8.1 Passiiviset palonsuojausmenetelmät	53
3.8.2 Aktiiviset palonsuojausmenetelmät	55
3.9 Hyväksymiskriteerit	59
4 TOIMINNALLINEN PALOMITOITUS RAKENNUSHANKKEESSA	60
4.1 Työnjako	60
4.1.1 Rakennushankkeen vaiheet.....	60
4.1.2 Rakennushankkeen osapuolet.....	62
4.1.3 Paloturvallisuussuunnittelun prosessi	64
4.1.4 Viranomaisyhteistyö	67
4.1.5 Kolmannen osapuolen tarkastelu	69
4.2 Ohjeet raportointiin	70
4.2.1 OSA 1 Esitietopaperi	71
4.2.2 OSA 2 Suunnitelmat	72
4.2.3 Pelastussuunnitelmat.....	73
4.2.4 Huolto- ja käyttöohje	74
5 CASE OULUHALLIN LAAJENNUKSEN LIKUNTASALIN TERÄSRISTIKOIDEN TOIMINNALLINEN TARKASTELU	75
5.1 Kohteen esittely.....	75
5.2 Paloskenaariot ja mitoituspalo	75
5.3 Laskelmat	77
5.3.1 ELEFIR-EN:	78
5.3.2 PyroSim	79
5.4 Tulosten tarkastelu	82
5.4.1 Tapaus 1: Esiintymislavan palo	86
5.4.2 Tapaus 2: Myyntikojujen palo	89
5.4.3 Tapaus 3a katsomopalo.....	91
5.4.4 Tapaus 3b Katsomopalon herkkyystarkastelu	94
6 YHTEENVETO	96
7 LÄHDELUETTELO.....	98
LIITTEET	104

LIITTEET:

Liite 1. Sprinklauksen huomioon ottaminen

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A_f palavan kohteen pinta-ala

A_m sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti

Δt aikaväli

c_a teräksen ominaislämpö

$E_{fi,d}$ Standardin SFS-EN 1991-1-2 mukainen mitoitusarvo kuormien vaikutuksista palomitoitustilanteessa

h_{net} pinta-alan yksikköä kohden laskettu nettolämpövuoto

k Sprinklerin palotehoa alentavan vaikutuksen kuvaamiseen käytettävä tekijä

k_{sh} varjostusvaikutuksen korjauskerroin

p potenssilakimallin potenssi, joka kuvaa parhaiten mitatun palotehon kehittymistä

$R_{fi,d,t}$ Ajan hetkellä t mitoitusarvo teräsrakenneosan kestävyydelle.

t aika

t_0 ajanhetki, jolloin paloteho alkaa kasvaa voimakkaasti

t_1 ajanhetki, jolloin kasvuvaihe loppuu

t_2 ajanhetki, jolloin hiipuminen alkaa

t_3 on ajanhetki, jolloin palo loppuu

t_p sprinklerin laukeamishetki

t_g on aika, joka kuluu palotehon kasvamisen alkamisesta hetkeen, jolloin paloteho saavuttaa arvon 1 W

Q_0 vakio, jonka arvoksi on valittu 1000 kW

Q_{max} maksimipaloteho

Q'' palavan kohteen tuottama paloteho pinta-alayksikköä kohti

q palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohti

V sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti

α_p kasvukerroin

α_c kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin

ε_m rakenneosan pinnan säteilykerroin

ε_f palon säteilykerroin

ε_{res} resuloiva emissiokerroin

τ aikariippuvuutta kuvaava aikavakio

$\theta_{a,cr}$ hiiliteräksen kriittinen lämpötila

θ_g kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneosan lähellä

θ_m rakenneosan pintalämpötila

θ_r paloympäristön tehollinen säteilylämpötila

ρ_a teräksen tiheys

μ_0 hyväksikäyttöaste

η_{fi} pienennystekijä SFS-EN 1993-1-2 kohdan 2.4.3(3) mukaisesti

$\gamma_{M,fi}$ materiaaliominaisuuden osavarmuusluku palotilanteessa

γ_{M0} osavarmuusluku

φ näkyvyyskerroin

σ Stefan-Boltzmannin vakio

1 JOHDANTO

Rakennuksen olennaisten teknisten vaatimusten täytyminen paloturvallisuuden kohdalla voidaan toteuttaa Ympäristöministeriön asetuksen mukaisesti kahdella tavalla. Perinteisesti käytetty tapa on suunnitella Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta esitettyjen luokkien ja lukuarvojen mukaisesti ja näin täyttää rakennukselle asetetut vaatimukset. Näille P1-, P2- ja P3-paloluokan rakennuksille annetaan palonkestävyys vaatimus, joka osoitetaan R-kirjaimella ja sen perässä olevalla luvulla, joka kertoo palonkestävyysvaatimuksen minuutteina. Arvot vaihtelevat paloluokasta ja -kuormasta riippuen eri rakennuksissa R30 ja R240 välillä. Taulukkomitoitus perustuu standardipalon lämpötila-aikakäyrään, joka kuvaa tavanomaisien palojen äärimmäisiä arvoja, eikä siihen voi yhdistää kohteen tai palon ominaisuuksia. Myöskään palon syttymis- tai kytemisvaihetta ja palon jäähtymistä ne eivät sisällä.

Oletetun palokehityksen mitoitustapauksissa ei käytetä R kirjainta osoittamaan rakennusosien kantavuusvaatimusta. Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta oletettuun palonkehityksen riittävälle paloturvallisuudelle annetaan vaatimukset erikseen: rakennus ei riittävällä luotettavuudella saa sortua palon eikä jäähtymisvaiheen aikana. Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden palotehokäyrä määritetään tapauskohtaisesti ja palamiseen kuluva aika riippuu palokuorman laadusta ja määrästä. Kohteessa voi olla useampia mitoittavia palotehokäyriä riippuen paikallisen palon sijainnista. Palon koko eli mitoituspalon pinta-ala, sijainti ja kehitymisnopeus sekä palavien aineiden ominaisuudet otetaan mitoituksessa huomioon. Oletetussa palonkehityksessä voidaan ottaa huomioon lämpötilan hitaampi nousu ja automaattisen sammutuslaitteiston kantavien rakennusosien jäähtytys. Paloluokka P0 on käytössä oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa, kun rakennus oleellisilta osin tai kokonaan perustuu kyseiseen menetelmään.

Menetelmään perustuva suunnittelu on aina kohdekohtaista, jolloin suunnitteluryhmän ja viranomaisten yhteistoiminta projektissa on tehtävä mahdollisimman joustavaksi. Yhteisten käytäntöjen luominen edesauttaa suunnitteluprosessin etenemistä. Paloturvallisuussuunnittelijan ja 3. osapuolen tarkastelun kiinnittäminen hankkeen

alkuvaiheessa on suotavaa, sillä hankkeen edetessä muutosten tekeminen voi osoittautua hankalaksi. Viranomaisten käytäntöjen yhtenäistämiseksi oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa esitetään käytettäväksi esitietopaperia ja raporttia mitoituksista. Oletetun palonkehityksen suunnittelun myötä on mahdollista saavuttaa rakenteiden kevyempi suojaus tai rakenteet ilman palosuojausta esim. pienen palokuorman tilat tai korkealla sijaitsevat rakenteet. Tavoitteena on paloturvallisempi ja kustannustehokkaampi ratkaisu.

Toiminnallista palomitoitusta voitaisiin käyttää nykyistä enemmän, mutta rakennushankkeeseen kuuluvat eivät välttämättä tunne tätä mitoitusapaa yhtä hyvin kuin taulukkomitoitusta. Siksi aiheesta kertovan diplomityö tarkoituksena on lisätä tietoutta ja osaamista toiminnalliseen palomitoitukseen, minkä lisäksi selkeyttää rakennushankkeen osapuolien yhteistyötä. Työssä käsitellään kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuvaa suunnittelua ja tarkastellaan yksi esimerkkitapaus, jossa tätä mitoitusapaa voidaan käyttää. Työn kirjallisuustutkimusosassa käsitellään aluksi paloturvallisuuden säädöksiä ja standardeja liittyen teräsrakenteiden toiminnalliseen palomitoitukseen. Tarkastelu jatkuu toiminnallisessa mitoituksessa käytettävien menetelmien ja ohjelmien läpi käymisellä, minkä jälkeen jatketaan toiminnallisen mitoitusavan käytöstä rakennushankkeessa. Kirjallisuustutkimuksessa esitetyjä asioita hyödynnetään työn tapaustutkimusosassa, jossa case-esimerkkinä on Ouluhallin laajennuksen liikuntasalin teräsristikoiden toiminnallinen tarkastelu.

2 PALOTURVALLISUUDEN SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT

2.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki

Rakentamisen kannalta tärkein dokumentti on Maankäyttö- ja rakennuslaki. Sen tavoitteena on järjestää alueiden käyttö ja rakentaminen niin, että siinä luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä edistetään kestävästä kehitystä. Lain tavoitteisiin kuuluu lisäksi jokaisen mahdollisuus osallistua asioiden valmisteluun, suunnittelun laatuun, vuorovaikutteisuuteen, asiantuntemuksen monipuolisuuteen ja avoimeen tiedottamiseen käsiteltävinä olevissa asioissa (MRL, §1, 5.2.1999/132). Alueiden ja rakennusten suunnittelua, rakentamista ja käyttöä on säädetty Maankäyttö- ja rakennuslaissa (MRL, §2, 21.12.2012/958).

Maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 12 asetetaan kolme rakentamisen ohjauksen tavoitetta, joilla rakentamista pyritään edistämään. Elinympäristön kannalta tavoitteita ovat hyvä ja käyttäjän tarpeita palveleva, terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sekä sosiaalisesti toimiva ja esteettisesti tasapainoinen rakentaminen. Rakentamista ohjataan suuntaan, jossa elinkaaren kestävät ja taloudellisesti, sosiaalisesti ja ekologisesti toimivat sekä kulttuuriarvoja säilyttävät ratkaisut otettaisiin huomioon rakentamisessa. Lisäksi huomioitavaa on myös rakennetun ympäristön ja rakennuskannan kunnossapito ja jatkuva hoito suunnitelmallisesti. (MRL, §12, 5.2.1999/132.)

Rakentamiselle asetettavista vaatimuksista on säädetty Maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 117. Rakennuksen täytyy soveltua rakennettuun ympäristöön ja maisemaan, minkä lisäksi sen tulee täyttää kauneuden ja sopusuhtaisuuden vaatimukset. Sen tulee täyttää siihen ennakoitavissa olevat kuormitukset ja rakennuksen käyttötarkoituksen mukaiset olennaiset tekniset vaatimukset sekä olla tarkoitusta vastaava, korjattavissa, huollettavissa ja muunneltavissa. Rakennuksen käytön tulee soveltua myös henkilöiden käyttöön, joiden kyky liikkua tai toimia on rajoittunut. Ominaisuudet ja erityispiirteet, sekä soveltuvuus suunniteltuun käyttöön on huomioitava korjaus- ja muutostöissä, siten ettei käyttäjien turvallisuus vaarannu tai terveydelliset olot heikkene. Yleisesti rakentamisessa noudatetaan hyvää rakennustapaa. (MRL, §117, 5.2.1999/132.)

Rakentamisen olennaiset tekniset vaatimukset täyttävä rakennus on paloturvallinen, terveellinen, käyttöturvallinen, esteetön ja energiatehokas. Se on rakenteiltaan luja ja vakaa, sekä sen ääniolosuhteet ja meluallistus on otettu huomioon suunnittelussa. Palomitoituksen kannalta merkittävää on tutustua erityisesti paloturvallisuuden vaatimuksiin, mutta myös rakenteita koskeviin määräyksiin. (MRL, §117a, 21.12.2012/958.)

Rakennushankkeeseen ryhtyvä huolehtii, että rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa huomioidaan paloturvallisuuden vaatimukset rakennuksen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla. Paloturvallisuudelle asetetut vaatimukset täyttävän rakennuksen kantavat rakenteet kestävät palotilanteessa niille asetetun vähimmäisajan. Palotilanteessa tulee ottaa huomioon rakennuksen rakenteiden sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen. Paloturvallisessa kohteessa palon ja savun kehittymistä sekä niiden leviämistä pystytään rajoittamaan rakennuksessa ja siitä edelleen sen lähistöllä oleviin rakennuksiin. Rakennustuotteet sekä teknisten laitteistojen on oltava paloturvallisuuden kannalta soveltuvia. (MRL, §117b, 5.2.1999/132.)

Palon sattuessa rakennuksessa olevien on voitava pelastautua tai kohteessa olevat henkilöt on mahdollista pelastaa tavalla, jossa pelastushenkilöstön turvallisuus on huomioitu. Tarvittaessa lupaviranomainen edellyttää turvallisuusselvityksen laadittavaksi poistumisturvallisuuden kannalta erittäin vaativasta kohteesta. Tarkemmat säännökset uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostöitä ja rakennuksen käyttötarkoituksmuutosta varten esitetään Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta. (MRL, §117b, 5.2.1999/132.)

Rakenteiden lujuuden ja vakauden osalta rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava rakennuksen suunnittelusta ja rakentamisesta siten, että rakenteet ovat lujia ja vakaita, soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin ja kestävät rakennuksen suunnitellun käyttöiän. Suunnittelun ja mitoituksen on perustuttava rakenteiden mekaniikan sääntöihin ja yleisesti hyväksyttyihin suunnitteluperusteisiin, luotettaviin koetuloksiin tai muuhun käytettävissä olevaan tietoon. Rakentamisessa käytettävät rakennustuotteet on oltava rakenteiden lujuuden ja vakauden kannalta soveltuvia. Kohteen suunnittelussa ja rakentamisessa huomioidaan rakentamisen ja käytön aikana

kohdistuvat kuormitukset siten, etteivät ne aiheuta sortumista, lujuutta tai vakautta haittaavia muodonmuutoksia, eikä aiheuta vaurioita rakennuksen muihin osiin, asennettuihin laitteistoihin tai kiinteisiin varusteisiin. Lisäksi ulkoisen syyn aiheuttama vaurio ei voi olla suhteettoman suuri sen aiheuttaneeseen tapahtumaan verrattuna. Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa tarkempia säännöksiä rakenteiden vaadittavasta lujuudesta ja vakaudesta, kantavien rakenteiden suunnittelusta ja mitoituksista, rakentamisen ja käytön aikaisista kuormituksista sekä kantavissa rakenteissa käytettävistä rakennustuotteista. (MRL, §117a, 21.12.2012/958.)

Suomen kansalliset vaatimukset määritellään Maankäyttö- ja rakennuslaissa olennaisten teknisten vaatimusten pykälissä. Ne toimivat hyvänä pohjana, jota asetuksissa annettavat rakentamismääräykset täydentävät, mutta niitä ei kuitenkaan tule soveltaa kirjaimellisesti. Ympäristöministeriön asetukset kertovat, miten olennaiset tekniset vaatimukset täytetään ja suunnittelemalla rakennukset niiden mukaisesti täytetään olennaiset vaatimukset (RIL 195-1-2018: s. 15). Rakennustyöhön ryhtyvän on Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) nojalla osoitettava rakennuksen turvallisuus. Päätösvaltaisen viranomaisen on puolestaan Hallintolain 434/2003 mukaan päätöksessään perustellen ilmoittaa, sovelletut säännökset sekä seikat ja selvitykset, jotka ovat vaikuttaneet ratkaisuun.

2.2 Pelastuslaki

Pelastuslain tavoitteena on ihmisten turvallisuuden parantaminen ja onnettomuuksien vähentäminen. Onnettomuusuhan alla tai sen tapahduttua ihmiset pelastetaan, tärkeät toiminnot turvataan ja onnettomuuksien seurauksia rajoitetaan tehokkaasti. Toiminnoilla pyritään ihmisten, omaisuuden ja ympäristön haittojen minimointiin. (Pelastuslaki §1, 28.12.2018/1353.)

Pelastuslaissa velvoitetaan ihmisiä, yrityksiä sekä muita yhteisöjä ja oikeushenkilöitä toimimaan turvallisuuden parantamiseksi ja onnettomuuksien vähentämiseksi. Velvollisuutena on ehkäistä tulipaloja ja muita onnettomuuksia, joihin varautuminen helpottaa toimintaa onnettomuuksien uhatessa ja sattuesssa. Onnettomuustilanteisiin ja toimintaan varautuminen pyrkii rajoittamaan onnettomuuksien seurauksia. Velvollisuuksiin kuuluvat myös väestönsuojien rakentaminen ja ylläpito, sekä

osallistuminen pelastustoiminnan tehtäviin ja väestönsuojakoulutukseen. Pelastuslaissa säädetään myös pelastustoimen viranomaisten tehtävästä ohjata, neuvoa ja valvoa lain tavoitteiden täyttymistä. Pelastustoimen viranomaisten ja Rajavartiolaitoksen tehtävistä pelastustoiminnassa ja heidän toimivallastaan pelastustoimessa on säädetty pelastuslaissa. (Pelastuslaki §2, 28.12.2018/1353.)

Lain yleinen toimintavelvollisuus edellyttää jokaista tulipalon tai muun onnettomuuden havainnutta ilmoittamaan vaarassa oleville, tekemään hätäilmoituksen ja ryhtymään kykyjensä mukaisiin pelastustoimenpiteisiin, mikäli he eivät heti voi sammuttaa paloa tai torjua vaaraa (Pelastuslaki §3, 28.12.2018/1353). Toiminnanharjoittajan sekä rakennuksen omistajan ja haltijan velvollisuuksiin kuuluvat rakennusten palo- ja poistumisturvallisuudesta sekä rakennusten kunnosta huolehtiminen. Rakennuksen, rakennelman ja sen ympäristön kunto edellyttää tulipalon syttymisen, tahallisen sytyttämisen sekä leviämisen vaaran olevan vähäistä. Tulipalossa tai muussa äkillisessä vaaratilanteessa on pelastustoiminnan oltava mahdollista ja rakennuksessa olevien henkilöiden on pystyttävä poistumaan rakennuksesta tai heidät täytyy voida pelastaa muulla tavalla pelastushenkilöstön turvallisuus huomioiden. (Pelastuslaki §9, 28.12.2018/1353.)

Rakennusten poistumisturvallisuusselvitys on päivitettävä kolmen vuoden välein tai siinä tapauksessa, että rakennuksessa tapahtuva toiminta muuttuu olennaisesti. Poistumisturvallisuutta arvioi alueen pelastusviranomainen poistumisturvallisuusselvityksen perusteella. Selvitys lähetetään myös rakennusvalvontaviranomaiselle, sillä Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää rakennuslupaa, jos muutoksilla arvellaan olevan vaikutusta käyttäjien turvallisuuteen tai rakennuksen käyttötarkoitus olennaisesti muuttuu. (Pelastuslaki §19, §20, 29.4.2011/379, MRL §125, 5.2.1999/132.)

2.3 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta

Maankäyttö- ja rakennuslaissa määritetään asianomaisen ministeriön tehtävät, joihin kuuluvat alueiden käytön suunnittelu ja rakennustoimen yleinen kehittäminen sekä ohjaus. Asianomaisella ministeriöllä tarkoitetaan lähtökohtaisesti Ympäristöministeriötä tässä asetuksessa (MRL §17, 5.2.1999/132). Asetus on velvoittava sekä rakennustyöhön

ryhtyvälle että viranomaiselle ja ainoastaan maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellyt tavat poiketa ovat hyväksyttäviä. Poikkeamistoimivallasta ja poikkeamisen edellytyksistä on määritelty Maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 171 (18.3.2016/196). Viranomaisten ei tule asettaa tiukempia vaatimuksia kuin mitä asetus edellyttää, sillä hyväksyttävään turvallisuustasoon pääsee suunnittelemalla ja rakentamalla asetuksen mukaisesti. Rakennustyöhön ryhtyvän on varmistettava asetuksessa osoitettujen vaatimusten täyttyminen (RIL 195-1-2018, s. 10).

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta pohjautuu Maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) ja sen pykälään 117b. Se antaa tarkempia säännöksiä uudisrakentamiseen ja rakennuksen laajentamiseen tai kerrosalaan laskettavan tilan lisäämiseen. Asetusta voidaan soveltaa myös korjaus- ja muutostyöhön siinä tapauksessa, kun rakennus tai sen osa muuttuu vaarallisemmaksi paloturvallisuuden osalta. Vuoden 2018 alussa voimaan astunut uusittu Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta on korvannut vanhan E1 asetuksen. (Srmk 2017, asetus §1.)

Maankäyttö- ja rakennuslaissa asetettujen olennaisten teknisten vaatimusten osoittaminen voidaan toteuttaa asetuksen mukaan kahdella tavalla. Asetuksessa esitettyjä luokkia ja lukuarvoja noudattamalla voidaan täyttää rakennukselle asetetut vaatimukset tai vaihtoehtoisesti rakennus voidaan suunnitella ja rakentaa oletettuun palonkehitykseen perustuen, jolloin kohteessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet otetaan huomioon tapauskohtaisesti. Suunnittelussa käytettävien menetelmien kelpoisuus on osoitettava, minkä lisäksi suunnittelun perusteet, käytetyt mallit sekä saadut tulokset tulee esittää rakennuslupamenettelyn yhteydessä. (Srmk 2017, asetus §3.)

Asetus jakaa rakennukset paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3. Luokkiin ja lukuarvoihin perustuvassa ns. taulukkomitoituksessa käytetään paloluokkia P1, P2 ja P3. Paloluokka P0 on käytössä oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa, kun rakennus oleellisilta osin tai kokonaan perustuu kyseiseen menetelmään. (Srmk 2017, asetus §2.)

On mahdollista, että rakennus jakaantuu eri paloluokkiin, mutta tällöin palon leviäminen palo-osastosta toiseen täytyy estää palomuurilla. Asetus antaa palomuurille

seuraavanlaisen määritelmän: ”Tässä asetuksessa tarkoitetaan palomuurilla seinää, joka määrätyn ajan estää palon leviämisen sen toiselle puolelle ja kestää siihen liittyvän rakennuksen tai sen osan sortumisen ja sortumisesta aiheutuvat iskut.” (Srmk 2017, asetus §2.) Palomuuria käsitellään tarkemmin asetuksen kohdassa ”palon leviämisen estäminen naapurirakennukseen”.

Palonkestävyysvaatimusluokitukseen perustuvassa mitoituksessa kantavuuden suhteen osoitetaan R-kirjaimella sekä sen perässä olevalla luvulla, joka ilmoittaa palonkestävyysvaatimuksen minuuteissa. Ympäristöministeriön asetus rakenteiden kantavuudesta palotilanteessa: ”Rakennus ja sen rakennusosat eivät saa aiheuttaa vaaraa sortumisen vuoksi määrättyä aikana palon alkamisesta. Jos henkilöturvallisuuden takia tai vahinkojen suuruuteen nähden on tarpeellista, rakennuksen on riittävän luotettavasti kestävä sortumatta koko palokuorman palaminen ja jäähtyminen.” (Srmk 2017, asetus §11.)

Luokkavaatimusten täyttymisen voi osoittaa kokeellisesti, laskennallisesti, yhdistämällä koe- ja laskennalliset tulokset tai hyväksyttävää taulukkomitoitusta käyttäen. Asetuksen pykälän 12 taulukko 3 kertoo kantavien ja jäykistävien rakenteiden palonkestävyysvaatimuksen P1- ja P2-paloluokan rakennuksissa. Arvot vaihtelevat paloluokasta ja -kuormasta riippuen eri rakennuksissa R30 ja R240 välillä. Oletetun palokehityksen mitoitustapauksissa ei käytetä R-kirjainta osoittamaan rakennusosien kantavuusvaatimusta. (Srmk 2017, asetus §12.)

Asetuksen pykälässä 13 oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden riittävälle paloturvallisuudelle annettavia vaatimuksia on kaksi kappaletta. Rakennus ei riittävällä luotettavuudella saa sortua palon eikä jäähtymisvaiheen aikana. Tällaisia ovat yli kaksikerroksiset rakennukset, sekä henkilöturvallisuuden näkökulmasta vaativa rakennus, joka voi olla esimerkiksi hoitolaitos, mutta tulkinta on tehtävä tapauskohtaisesti. Toinen vaatimustaso edellyttää, ettei rakennus sorru poistumisen turvaamiseen, pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana. yksi- ja kaksikerroksiset rakennukset kuuluvat tähän jälkimmäiseen tasoon. Oletetussa palonkehityksessä voidaan ottaa huomioon lämpötilan hitaampi nousu ja automaattisen sammutuslaitteiston kantavien rakennusosien jäähdytys. (Srmk 2017, asetus §13.)

Asetuksen pykälässä 13 olevan taulukon 4 avulla voidaan määrittää olennaisten kantavien rakenteiden palonkestävyysvaatimus. Taulukossa kuvataan rakennus korkeuden, henkilömäärän ja käyttötarkoituksen perusteella. Kerroskorkeudesta ja käyttötarkoituksesta riippuen vaadittava aika on 30 tai 60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta. Taulukon tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle, mutta mikäli on mahdollista osoittaa, ettei lieskahtamista tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Tällöin palorasitus on oltava sellainen, että se huomioi rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet ja suunnitellaan oletetun palonkehityksen mukaisin olosuhtein. (Srmk 2017, asetus §13.)

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden palokäyrä määritetään tapauskohtaisesti. Paikallisen palon palotehon arvot vaihtelevat yleensä 2-200MW välillä. Palamiseen kuluva aika riippuu palokuorman laadusta ja määrästä. Kohteessa voi olla useampia mitoittavia palotehokäyriä riippuen paikallisen palon sijainnista. Palon koko eli mitoituspalon pinta-ala, sijainti ja kehittymisnopeus sekä palavien aineiden ominaisuudet otetaan mitoituksessa huomioon. (Srmk 2017, perustelumuistio s.17.)

Asetus edellyttää, että P0 -paloluokan rakennuksissa on käytettävä rajoitusmerkintää. Sitä tulee käyttää myös lupahakemukseen perustuvassa suunnitelmassa, jossa henkilömäärä on rakennuksen kokoon nähden normaalia vähäisempi tai palokuorma kyseisessä rakennuksessa normaalia pienempi. Tällöin henkilömäärää tai palokuormaa koskevat tiedot tulee ilmoittaa rakennuslupapäätöksessä. Asiasta ilmoittava kiinteä merkintä on sijoitettava rakennukseen helposti havaittavaan paikkaan. (Srmk 2017, asetus §9.)

Taulukko 1. Ympäristöministeriön asetuksen mukaiset paloluokat ja niiden kuvaus. (Srmk 2017, asetus §4.)

Paloluokka	Kuvaus
P0	Toiminnalliseen palomitoitukseen perustuva suunnittelu.
P1 "Kestää palon"	Rakennuksen koko tai henkilömäärä on rajoittamaton. Yli 2-kerroksisissa rakennuksissa kantavat rakenteet oletetaan tietyllä varmuudella kestävän palossa sortumatta.
P2 "Tiukat pintaosien vaatimukset pidättelevät paloa"	Käyttötarkoituksesta riippuen rajoituksia rakennuksen kokoon ja henkilömääriin. Kantavat rakenteet P1-luokan vaatimuksia matalammat. Asetetaan vaatimuksia pintaosien ominaisuuksille ja paloturvallisuutta parantaville laitteille.
P3 "Riittävä turvallisuustaso"	Käyttötarkoituksesta riippuen rajoituksia rakennuksen kokoon ja henkilömääriin, jolloin saavutetaan riittävä turvallisuustaso. Paloluokka P3 ei aseta kantavien rakenteiden palonkestävyykselle erityisvaatimuksia

Asetuksessa säädetään lisäksi palo-osastoinnista, palokuormaryhmistä, pääkäyttötarkoituksesta, palon kehittymisen rajoittamisesta, poistumisesta palon sattuessa, paloteknisistä laitteistoista ja sammutus- ja pelastustehtävien järjestelystä. Palotekniseen suunnitteluun tai oletetun palonkehityksen suunnitelmiin voi kuulua poistumistarkastelu tai -simulointi, jolloin poistuminen palon sattuessa osioon täytyy kiinnittää enemmän huomiota. Tässä työssä tarkastellaan palonkehitystä ja sen vaikutusta rakenteisiin.

2.4 Standardit

Ympäristöministeriö voi julkaista ohjaavia ja opastavia normeja, jotka ovat säädökset täyttäviä ratkaisuja. Ne eivät ole juridisesti velvoittavia, vaan muut säädösten vaatimukset täyttävät ratkaisut ovat yhtä lailla hyväksyttäviä. Noudattamalla ohjeita viranomaisten tulisi kuitenkin hyväksyä ratkaisu. Samaan kategoriaan kuuluvat standardit, joista osa voi olla velvoittavia, mutta ne ovat erikseen säädetty ylemmän tason normissa. Muita kuin ohjeita, standardeja tai muita opastavia ja ohjaavia normeja

käyttämällä täytyy osoittaa ratkaisuiden rakentamiselle asetettujen olennaisten teknisten vaatimusten täyttyminen. (RIL 195-1-2018: s. 11-12.)

Taulukko 2. Eurokoodi-standardi

Eurokoodi-standardi	Standardiin liittyvien osien lukumäärä
EN 1990 Eurokoodi 0: Suunnitteluperusteet	1
EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat	10
EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu	4
EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu	20
EN 1994 Eurokoodi 4: Betoni-teräs-liittorakenteiden suunnittelu	3
EN 1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu	3
EN 1996 Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu	4
EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu	2
EN 1998 Eurokoodi 8: Maanjäristysmitoitus	6
EN 1999 Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu	5

Eurokoodit on laadittu edistämään Euroopan sisäistä kauppaa. Ennen eurokoodeja kaikilla Euroopan mailla on ollut omat kansalliset standardit ja ohjeet, mikä on johtanut rakennustuotteiden testaukseen jokaisessa maassa erikseen, jotta voi saada maakohtaisen hyväksynnän toisesta maasta tulleelle tuotteelle (SFS 2018, s.3). Teknisten vaatimusten yhtenäistäminen ja kaupan teknisten esteiden poistaminen olivat Eurokoodien tavoitteita. Aluksi ne toimivat kansallisten määräysten ja ohjeiden vaihtoehtoina ja myöhemmin niiden oli tarkoitus korvata ne kokonaan. Vuonna 1992-1998 julkaistuihin esistandardien jätettiin kuitenkin kansallisesti valittavia arvoja. Nykyiset EN-standardiversiot julkaistiin vuosina 2002-2007. Ne sisältävät kansallisesti määritettäviä arvoja, jotka julkaistaan eri maissa kansallisina standardeina,

viranomaismääräyksinä tai -ohjeina. EN-eurokoodeja käytetään Euroopan unionissa ja Euroopan talousalueella. Viimeisimmät muutokset Eurokoodi 3:een on tehty vuonna 2014, jonka jälkeen on keskitytty Eurokoodin toisen sukupolven kehittämiseen. Tämä systemaattinen revisiointiohjelma on arvioitu valmistuvan 2020-luvun alkupuolella ja se koskettaa suurta osaa Euroopan taloudesta, sillä se vaikuttaa n. 500 000 suunnittelijan työhön (TRY, 2016). SFS:n mukaan seuraavan sukupolven arvioidaan tulevan käytäntöön vuonna 2025. Työ tehdään komission toimeksiantona ja osittain komission rahoittamana. Uudistusten tarkoituksena on kansallisesti määrättyjen arvojen vähentäminen, helppokäyttöisyyden lisääminen sekä suunnittelusääntöjen täydentäminen. (SFS 2018, s.4-5.)

Kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja on Eurokoodissa kaiken kaikkiaan 58 kappaletta. Teräsrakenteiden palomitoituksessa tarvitaan eurokoodistandardeja 0, 1 ja 3 (SFS 2018, s.7). Eurokoodia voidaan käyttää, kunhan maassa on laadittu kansalliset liitteet. Eurokoodi antaa jokaiselle standardille tietyt kohdat, joissa kansallisia valintoja voidaan soveltaa. Kansallisten arvojen kohtia voivat olla kansallisen varmuustason määrittämiseen, paikallisten olosuhteiden huomioonottamiseen tai rakentamisen kustannustasoon liittyviä arvoja. Niistä on erikseen huomautus, jonka perään teksti, mitä kansallisella liitteellä voidaan korjata. Myös mitoituskaavat saavat sisältää kansallisten valintojen mahdollisuuden. Mikäli kansallinen liite sisältää informatiivisia liitteitä, niiden asema esitetään merkinnöillä voi käyttää, ei saa käyttää tai on pakko käyttää. (SFS 2018, s.10.) Eurokoodin kansalliset liitteet on päivitetty ja otettu käyttöön 2017, jolloin Ympäristöministeriö julkaisi rakentamismääräyskokoelman “Lujuus ja vakaus” –sarjan (SFS 2018, s.11). Tämän työn kannalta olennaisimpia standardeja ja niiden kansallisia liitteitä avataan hieman tarkemmin.

2.4.1 SFS-EN 1990

Eurokoodi 0-suunnittelun perusteet osasta on olemassa yksi standardiosa SFS-EN 1990. Siinä esitetään periaatteet ja vaatimukset rakenteiden varmuudelle, käyttökelpoisuudelle ja säilyvyydelle. Tämän standardin pohjalta pystytään osoittamaan suunnittelun ja vaatimustenmukaisuuden perusteet, sekä antamaan rakenteiden luotettavuuteen liittyviä ohjeita. Arvioitaessa korjaus- ja muutostöitä tai käyttötarkoituksen muutosta jo olemassa olevaan rakenteeseen voidaan käyttää tätä standardia yhdessä

rakennesuunnittelua koskevien standardien SFS-EN 1991-1999 kanssa. (SFS-EN 1990, s.22.)

Rakenteen tulee kestää kaikki kuormat ja vaikutukset, jotka ovat todennäköisiä toteutuksen ja käytön aikana. Lisäksi rakenteen suunnitellun käyttöiän aikana pitää luotettavuustasoon päästä taloudellisella tavalla. Rakenne on suunniteltava riittävän kestäväksi, käyttökelpoiseksi ja säilyväksi, sekä tulipalotilanteessa kestävä vaaditun ajan. Perusvaatimukset saadaan täytettyä, kun rakenne suunnitellaan valitsemalla käyttötarkoitukseen soveltuvat materiaalit, suunnittelemalla rakenne yksityiskohtineen asianmukaisesti ja määrittelemällä hankkeen prosessin aikaiset valvontamenettelyt. (SFS-EN 1990, s. 44, 46.)

SFS-EN 1990 soveltamisalaan kuuluvien rakenteiden luotettavuusvaatimus saavutetaan suunnittelemalla rakenne standardien EN 1990 – EN 1999 mukaan ja toteuttamalla kohde asianmukaisesti myös laadunhallintatoimenpiteitä käyttämällä. Aktiiviset ja passiiviset palonsuojaustoimenpiteet ovat rakenteiden kestävyys- ja käyttökelpoisuuteen liittyviä luotettavuustasoon vaikuttavia tekijöitä, joita voidaan yhdistää muihin vastaaviin luotettavuustasoa parantaviin toimenpiteisiin. Ennaltaehkäisevät ja suojaavien toimenpiteiden lisäksi mitoitussuunnitelmassa voidaan vaikuttaa luotettavuustasoon, jota myös laadunhallinta ja inhimillisten virheiden minimointi parantavat. Lisäksi esimerkiksi käytettävien mekaanisten mallien tarkkuus tai yksityiskohtainen suunnittelu ovat luotettavuutta parantavia. Viittaamalla standardeihin suunnitelmissa ja riittävän tarkastustoiminta myötä voidaan nostaa suunnitelmien luotettavuutta. Valvontatoimet suunnittelu-, toteutus-, käyttö- ja ylläpitovaiheissa ovat asianmukaisia laadunhallintatoimenpiteitä. Rakennuksen käyttöikä määrittää suunnittelun käyttöiän luokan väliltä 1-5, kun rakenteen suunniteltu käyttöikä on välillä 10-100 vuotta. (SFS-EN 1990, s. 46, 48, 50.)

Standardin SFS-EN 1990 opastava liite B antaa lisäohjeita luotettavuuden hallintaan rakennuskohteissa. Rakenteen vaurion ja vian seuraamusten tarkasteluun on määritelty seuraamusluokat CC1, CC2 ja CC3. Suurimmat seuraamukset ovat seuraamusluokassa CC3, johon hengenmenetyksen, hyvin suurien taloudellisten ja sosiaalisten tai ympäristövahinkojen tapaukset kuuluvat. Esimerkkeinä pääkatsomot tai julkiset rakennukset. Keskisuurten seuraamusten luokkaan CC2 kuuluvat asuin- ja

liikerakennukset ja julkiset rakennukset, kuten esimerkiksi toimistorakennukset. Tähän luokkaan kuuluvat rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 ja CC1. Vähäisten, pienten ja merkityksettömien rakennusten, kuten maa- ja metsätalousrakennusten kuten varastorakennusten, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä seuraamusluokka on CC1. Seuraamusluokkia CC1, CC2 ja CC3 vastaavat luotettavuusluokat ovat RC1, RC2 ja RC3. (SFS-EN 1990, s. 136, 138.)

Suunnittelun valvontatasoja on kolme kappaletta ja ne voidaan liittää luotettavuusluokkiin, jotka on valittu rakenteen merkityksen ja kansallisten vaatimusten tai käyttöohjeen mukaan. Laajan valvonnan tasoon kuuluvat luotettavuusluokkaan RC3 kuuluvat valvontatason DSL3 kohteet, joiden laskelmien, piirustusten ja eritelmien tarkastamiseen suositettuna vähimmäisvaatimuksena on kolmannen osapuolen suorittama tarkastus, jolloin muu kuin suunnitelman laatinut organisaatio suorittaa tarkastuksen. Normaalin valvonnan piiriin kuuluvat DSL2- ja DSL1-tasot. Tällöin 2-luokkaan kuuluvan kohteen tarkastuksen suorittavat muut kuin alun perin suunnittelusta vastuussa olevat henkilöt ja se voidaan suorittaa organisaation sisäisen oman menettelytavan mukaisesti. DSL1-tason tarkastuksen voi suorittaa suunnittelija itse. Suunnittelun valvonnan toteuttaa henkilöiden ja kohteen luokituksesta riippuva pätevä ja kokenut henkilö. (SFS-EN 1990, s. 140.)

2.4.2 SFS-EN 1991-1-2

Rakennesuunnittelua varten standardiosassa SFS-EN 1991-1-2 esitetään palolle altistettujen rakenteiden lämpörasitukset ja mekaaniset kuormat turvallisuusvaatimusten, mitoitusmenettelyiden ja suunnitteluvälineiden näkökulmasta. Maankäyttö- ja rakennuslaissa esitetyt paloturvallisuuden vaatimukset voidaan osoittaa valtion yleisten paloturvallisuuden hallintatapojen mukaisesti. Tavanomaisten ja luonnollisten paloskenaarioiden sekä passiivisten ja aktiivisten palonsuojaustoimenpiteiden käyttö on sallittua. Vaatimukset ja niitä vastaavat toimivuustasot määritellään yleensä kansallisissa palosäännöksissä esitettävän standardipalonkestävyyden avulla. Toinen vaihtoehto on selvittää, salliiko kansalliset palosäännökset passiivisten ja aktiivisten toimenpiteiden vaikutusten huomioimisen paloturvallisuussuunnittelussa. (SFS-EN 1991-1-2, s.10.)

Mitoitusmenettelyt jaetaan kahteen ryhmään: yksityiskohtaisiin sääntöihin tai toimivuuteen perustuviin käsittelytapoihin. Yksityiskohtaisten sääntöjen käsittelytavassa käytetään nimellispaloa selvittämään lämpörasituksia. Kun toimivuuteen perustuvat käsittelytavat otetaan huomioon paloturvallisuussuunnittelun keinoin, määritetään lämpörasitukset fysikaalisten ja kemiallisten parametrien perusteella. Rakenteiden lämpörasitusten ja mekaanisten kuormien laskentaan standardi SFS-EN 1991-1-2 esittää tarvittavat pääperiaatteet ja -säännöt. Sitä käytetään yhdessä standardien EN 1992 - EN 1996 ja EN 1999 palomitoitusosien kanssa. (SFS-EN 1991-1-2, s. 12, 14.)

Nimellispaloon liittyvät sekä fysikaalisiin parametreihin perustuvat lämpörasitukset esitellään standardissa SFS-EN 1991-1-2. Liitteet sisältävät fysikaalisiin parametreihin perustuvaa tietoa ja malleja rakenteisiin kohdistuvista lämpörasituksista. Tämä standardi ei käsittele palon jälkeisten vaurioiden arviointia. Jotta tätä standardia voidaan käyttää, oletuksena on, että mitoituspaloskenaario valitaan pätevän ja kokeneen henkilön toimesta tai se esitetään asianomaisissa kansallisissa säännöksissä. (SFS-EN 1991-1-2, s. 14, 16.)

Ympäristöministeriön asetus 5/16 ”Palolle altistettujen rakenteiden rasituksista koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1991-1-2” määrää rakennesuunnittelijaa soveltamaan asetusta, ottaessa huomioon palolle altistettujen rakenteiden rasituksia standardin SFS-EN 1991-1-2 viimeisimmän version kanssa. Asetuksen nojalla standardin 1991-1-2 liitettä F ei sallita sovellettavaksi ja liitteen E käy sovellettavaksi palokuormien tiheyden osalta ainoastaan kohdan E.4 Lämmönluovutusnopeus Q mukaisesti. (Srmk 2016, §2, §5, §6.)

Taulukkomitoituksessa käytetään Standardin kohdan 3.2.1(1) mukaista standardipalon lämpötila-aikakäyrää. Kun kyseessä on oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus ja rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet, hyväksyttäviä menetelmiä ovat luonnollisten palojen mallit ja muut nimelliset lämpötila-aikakäyrät. (Srmk 2016, §3.) Suomessa palotilanteessa käytetään hyötykuormiin pitkäaikaisarvoa $\psi_{2,1}Q_1$ standardin kohdan 4.3.1(2) mukaan. Lumi-, jää- ja tuulikuormiin käytetään sen sijaan EN 1990 kansallisten valintojen tavallista arvoa $\psi_{1,1}Q_1$. (Srmk 2016, §4.)

2.4.3 SFS-EN 1993-1-1

Eurokoodi 3 on tarkoitettu teräksestä rakennettujen maa- ja vesirakennuskohteiden suunnitteluun. Se täyttää standardin EN 1990 asettamat vaatimukset koskien periaatesääntöjä, rakenteiden varmuutta ja käyttörajatiloja, suunnitteluperusteita ja todentamista. Eurokoodi 3 koskee vain teräsrakenteiden kestävyyttä, käytettävyyttä, säilyvyyttä ja palonkestävyyttä koskevia vaatimuksia. (SFS-EN 1993-1-1, s. 8) Sitä käytetään yhdessä muiden eurokoodien kanssa, kun viitataan teräsrakenteisiin ja teräksisiin rakenneosiin. Eurokoodi 3 jakaantuu 6 osaa, joista jokainen koskee erityisiä teräsrakenneosia, rajatiloja tai materiaaleja. Hyväksyttyyn luotettavuustasoon päästään käyttämällä suositeltuja perusarvoja, jotka on esitetty osavarmuusluville ja muille luotettavuuteen liittyville muuttujille olettaen, että työn taso on tarkoituksenmukaista ja laatuohjattua. (SFS-EN 1993-1-1, s. 6) Yleisten olettamusten lisäksi sovelletaan standardia EN 1090, jonka mukaan rakenteiden toteuttaminen tehdään. (SFS-EN 1993-1-1, s. 10)

Standardi SFS-EN 1993-1 on eurokoodi 3:n yksi osa, joita eurokoodin muut osat täydentävät. SFS-EN 1993-1:ssä käsitellään yleisiä suunnittelusääntöjä ja se sisältää kaksitoista osaa, jotka käsittelevät erityisiä teräsrakenneosia, rajatiloja tai materiaaleja. (SFS-EN 1993-1-1, s. 8.) Tässä diplomityössä esitellään lyhyesti osat 1, 2 ja 4. Suomen kansalliset vaatimukset on esitetty lähteessä: YM, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Teräsrakenteet.

Standardissa SFS-EN 1993-1-1 esitetään suunnittelua koskevia perussääntöjä, joiden ehtona on teräksen vähintään 3 mm ainepaksuus. Teräsrakenteisille rakennuksille esitetään lisäksi lisäsääntöjä merkinnällä ”B”. Standardia SFS-EN 1990 täydentävät lisäsäännöt esitetään kappaleissa 1 ja 2. Käsiteltäviä asioita ovat myös niiden tuotteiden materiaaliominaisuudet, jotka on tehty niukkaseosteisista rakenneteräksistä. Lisäksi se sisältää sääntöjä sauvojen rakenneanalyysiin ja poikkileikkausten mitoitus tapauksiin sekä käyttörajatilamitoitusta ja säilyvyyttä koskeviin sääntöihin. (SFS-EN 1993-1-1, s. 9.)

Standardi SFS-EN 1993-1-12 on laajennus S700 teräslajeihin asti. Tässä standardissa esitetään lisäsääntöjä Eurokoodi 3 muihin standardeihin niin, että teräsrakenteiden

suunnittelu on mahdollista myös tapauksissa, joissa teräslaji on suurempi kuin S460, mutta maksimissaan S700. Tässä diplomityössä esiintyvissä standardeissa lisäsäännöt koskettavat ainoastaan standardia SFS-EN 1993-1-1. Kansallinen liite SFS-EN 1993-1-12 voi asettaa maakohtaisia valintoja alkuperäisessä standardissa esitettyjen kohtien mukaan. (SFS-EN 1993-1-12, s. 4-7.)

2.4.4 SFS-EN 1993-1-2

Standardi EN 1993-1-2 käsittelee tulipalosta syntynyttä onnettomuustilannetta niiden kantavien teräsrakenteiden suunnittelun osalta, joille on annettu kantavuusvaatimus palotilanteessa odottamattoman sortuman välttämiseksi. Periaate- ja soveltamissäännöt rakenteiden suunnittelun vaatimusten suhteen kuorman kantokykyä ja toimivuustasoa koskien on esitetty tässä standardissa. Aktiivisia palonsuojausmenetelmiä ei oteta huomioon, vaan käsiteltävänä on ainoastaan passiiviset menetelmät, joissa oletuksena on, että niitä huolletaan riittävästi. Standardi esittää ainoastaan erot ja lisäykset kantavien teräsrakenteiden normaalilämpötilamitoitukseen verrattuna ja sitä käytetään yhdessä standardien EN 1993-1-1 ja EN 1991-1-2 standardien kanssa. (SFS-EN 1993-1-2, s. 8, 10.)

Standardin SFS-EN 1993-1-2 menetelmät käyvät teräslajeille S235, S275, S355, S420 ja S460, jotka on esitetty standardissa EN 10025. Ne soveltuvat myös niille teräslajeille, joiden materiaaliominaisuudet korkeissa lämpötiloissa on käytettävissä eurooppalaiseen yhdenmukaistettuun standardiin perustuen. Lisäksi sauvat ja muotolevyt, jotka on valmistettu standardin SFS-EN 1993-1-3 kylmämuovatuista tai standardin SFS-EN 1993-1-4 ruostumattomista teräksistä soveltuvat käytettäväksi. Betoni-teräsliittorakenteiden palonkestävyys suoritetaan standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaan. (SFS-EN 1993-1-2, s. 8, 9.)

3 TOIMINNALLISESSA PALOMITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT

3.1 Yleistä

Rakennuspallo voidaan jakaa kahteen erilaiseen tilanteeseen avopalon tai huonepalon kehittymistä tarkastelemalla. Avopalossa palamisilman määrä on rajaton ja tila on avoin, jolloin savu pääsee poistumaan palossa hyvin, eikä näin ollen estä palamisilman saantia. Tällaisessa tilanteessa palon kehitys määräytyy ainoastaan palavan aineen ominaisuuksista, joista tärkeimpinä aineen palamiseen osallistuva pinta-ala, palamisen etenemisnopeus aineessa ja aineen kosteus. Suljetussa tai osittain suljetussa tilassa syntyvässä palossa savu ja lämpösäteily eivät pääse poistumaan vapaasti, jolloin se rajoittaa palamisilman saantia. Myös Eurokoodi 1:ssä esiintyvällä huonepalolla voidaan tarkoittaa esimerkiksi asuinhuoneistojen, palo-osaston, kellaritilan, ullakon tai teollisuushallin paloja. (Hyttinen ym. 2014, s. 56.)

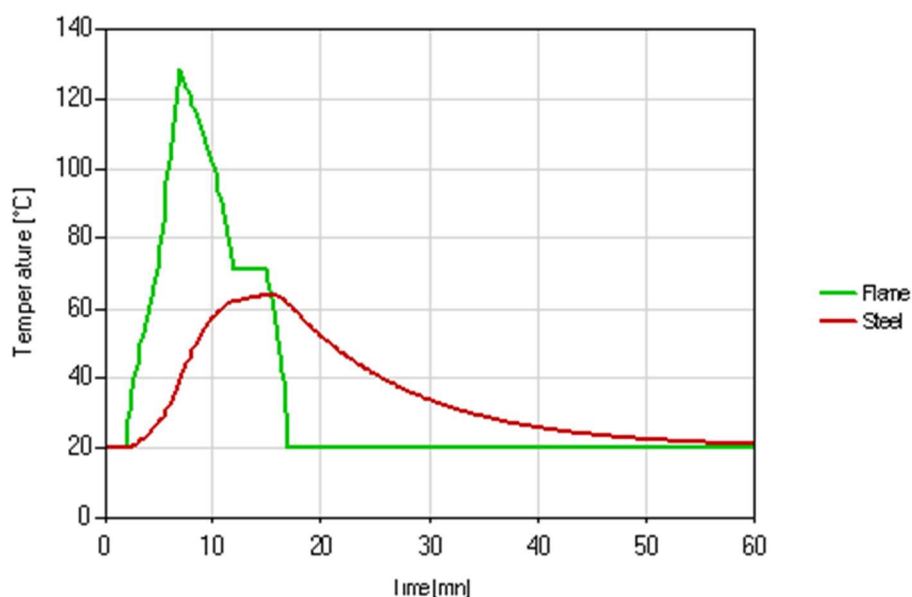
Normaali huonepalo voidaan jakaa karkeasti kolmeen vaiheeseen. Palo saa alkunsa syttymislähteestä tarvittavan hapen, riittävän suuren lämpötilan ja palavan materiaalin reaktiosta. Alkupalon vaiheessa palaessa syntyy lämpöä ja savua huonetilan yläosaan muodostaen savupatjan. Tässä vaiheessa palo käyttää tilan happea, jonka pitoisuus pienenee, jolloin alkupalossa tilaan muodostuu hiilimonoksidia ja muita syttyviä kaasuja. Niiden pitoisuuden kasvaessa ja saavuttaessa alemman syttymisrajan, syntyy leimahdus ja alkupalon vaihe päättyy. Mikäli leimahdusta ei synny alkupalo voi päättyä myös jäähtymiseen tai vakiotehon vaiheeseen. Leimahdus tarkoittaa rajatussa tilassa olevien syttyvien kaasujen yhtäkkistä osittaista tai niiden kokonaan syttymistä ja se kestää vain muutamia sekunteja. Savun lämpötila nousee nopeasti 400-600 °C:een ja kaikki huoneessa oleva palava materiaali syttyy tuleen kuumen ja palavan savun aiheuttaman lämpövirran tiheyden kasvun seurauksena. (Hyttinen ym. 2014, s. 57-58.) Tulipalo ja tila muodostavat systeemin, jossa lämpöhäviöt ja lämpötuotot eivät ole stabiilissa tilassa, eikä systeemi päädy tasapainotilaan (Hietaniemi 2007, s. 20).

Leimahdus on portti täyden palon vaiheeseen. Tällöin lieskahduksessa rajatun tilan palavien tarvikkeiden pinnat syttyvät nopeasti. Täyden palon vaiheessa rikkoontuvat myös tilassa olevat ikkunat ja ikkuna-aukon alaosa ilmaa virtaa sisään ja liekehtivä

savu pyrkii ulos aukon yläosasta. Kaikki polttoaineet osallistuvat paloon ja savupatjan lämpötila nousee nopeasti 800-1000 °C:een lämpötilaan ja palamisen nopeus on lähes vakio. Palamisilman saanti ja poistuminen vaikuttavat merkittävästi huonepalon kehittymiseen. Huonepalon palamisnopeus, maksimilämpötila ja palonkesto riippuvat palokuormasta, aukkotekijöistä, palavan aineen laadusta, sammutustoimenpiteistä ja palotilan tilavuudesta. Aukkotekijä laskemalla voidaan arvioida palamisilman saanti ja savun poistumisen tehokkuus. (Hytinen ym. 2014, s. 59, 62-63.)

Ajan kuluessa paloteho ja liekehtiminen heikkenee, jolloin palo siirtyy hiipuvan palon vaiheeseen ja alkaa kytämään. Vielä tässäkin vaiheessa täytyy olla tietoinen, ettei vaara ole vielä ohitse. Esimerkiksi kuumat seinä- ja kattopinnat aiheuttavat edelleen polttoaineiden pyrolyysiä, eli aineen kemiallista hajoamista lämmön vaikutuksesta. (Hytinen ym. 2014, s. 20.)

Kuva 1. Karkea esimerkki luonnollisen palon lämpötilasta °C ajan [min] funktiona. Kuvaajassa mukana myös teräsrakenteen lämpötilakehitys.



3.2 Nimelliset lämpötila-aikakäyrät

Standardin SFS-EN 1991-1-2 kansallinen liite sallii oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun ja rakentamisen käyttämällä luonnollisten palon malleja tai

muita nimellisiä lämpötila-aikakäyriä. Tämä edellyttää kuitenkin kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvien tilanteiden arviointia. Perinteiseen taulukkomitoitukseen on puolestaan käytettävä standardipalon lämpötila-aikakäyrää. (Srmk 2016, s.1.)

Nimellisiä lämpötila-aikakäyriä, joiden ei ole tarkoitus kuvata todellista paloa on esitetty standardissa kolme kappaletta. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä, ulkopuolisen palon käyrä ja hiilivetykäyrä. Ne kuvaavat tavanomaisia ja mielivaltaisia paloja, eikä niihin voi yhdistää kohteen tai palon ominaisuuksia. Palon syttymis- tai kytemisvaihetta ja palon jäähtymistä ne eivät sisällä. (Franssen 2010, s.18.)

3.2.1 Standardipalon lämpötila-aikakäyrä

SFS-EN 1363-1 standardin lämpötila-aikakäyrää käytetään hyvin yleisesti standardisoiduissa palotesteissä arvioitaessa rakenteiden ja erillisten elementtien altistumista palotilanteessa. Käyrä ilmoittaa kaasun lämpötilan palotilassa sijoittamalla kaavaan halutun ajanhetken minuuteissa. (Franssen 2010, s.18.) Standardipalossa laskennallinen lämpötila nousee hyvin jyrkästi koko palotilassa ja nousu jatkuu hidastuen tarkastelun loppuun saakka. Se ei ota huomioon palotilan geometriaa, palokuormaa, hapen määrää palossa eikä palon hiipumisvaihetta. (Ruukki 2008, s. 4.) Standardipalon lämpötila-aikakäyrä (EN 1363, s.14, 5.1.1) lasketaan kaavalla

$$\theta_{g1} = 20 + 345 * \log_{10}(8 * t + 1) \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (1).$$

missä t on aika [s].

3.2.2 Ulkopuolisen palon käyrä

Ulkopuolisen palon käyrää käytetään, kun oletettu palo kohdistuu ulkoseinän ulkopinnalle eri osasta julkisivua. Paloaltistus voi tulla joko suoraan palotilasta tai palotila voi sijaita alla tai ulkoseinän vieressä. Koska rakennuksen ulkoseinät ovat harvoin tehty teräksestä, käyrää ei tyypillisesti voida käyttää teräsrakenteille, eikä sitä voida käyttää ulkopuolisiin teräksisiin rakenneosiin vaikuttavien lämpörasitusten laskentaan. Sille on annettu ohjeet erikseen Eurokoodin 1 liitteessä B. (Franssen 2010 s. 19.) Ulkopuolisen palon käyrä (SFS-EN 1991-1-2 s.42 3.2.2 (3.5)) lasketaan kaavalla

$$\theta_{g2} = 660 * (1 - 0,687 * e^{-0,32*t} - 0,313 * e^{-3,8*t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2).$$

missä t on aika [s].

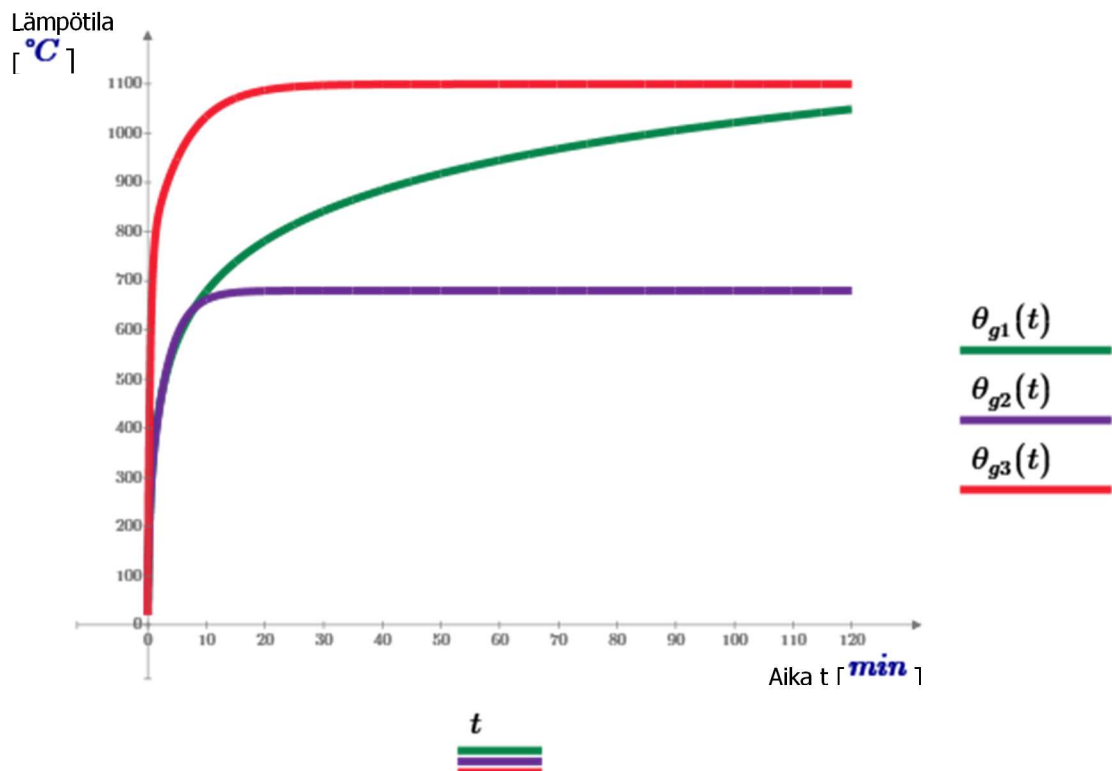
3.2.3 Hiilivetykäyrä

Hiilivetykäyrä kasvaa voimakkaasti ja saavuttaa vakioarvon 1100°C jo puolen tunnin kuluttua palon alkamisesta. Hiilivetykäyrä pysyy vakiona niin kauan kunnes palokuorma loppuu, toisin kuin standardipalokäyrä, joka jatkaa kasvuaan määrättömästi ajan kuluessa. (Franssen 2010 s.19.) Hiilivedyissä on nimensä mukaisesti hiiltä ja vetyä, joiden yhdisteitä käytetään mm. polttoaineissa. Hiilivetykäyrä (SFS-EN 1991-1-2 s.42 3.2.2 (3.6)) lasketaan kaavalla

$$\theta_{g3} = 1080 * (1 - 0,325 * e^{-0,167*t} - 0,675 * e^{-2,5*t}) + 20 [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

missä t on aika [s].

Kuva 2. Nimelliset lämpötila-aikakäyrät. Tarkasteltava aikaväli minuuteissa on 0 - 120 minuuttia.



3.3 Palotehon määrittäminen

3.3.1 Palotehon kehittyminen

Kasvuvaiheessa yleisin tapa on määritellä palon kehittymistä ajan suhteen kasvavana toisen asteen potenssifunktiona. Tästä t^2 -mallista on olemassa kaksi muotoa: vanhempi ja uudempi. Uudemmassa muodossa käytettävän vakion Q_0 arvoksi on sovittu 1000 kW. Palotehon kasvamisen alkamisesta siihen hetkeen, jolloin paloteho saavuttaa 1 W:n palotehon käytetään aikaa t_g . Vanhemmassa muodossa määritetään kasvukerroin $\alpha = 1000 \text{ kW}/t_g^2$. Tässä siis Q_0 -arvo sisältyy kasvukertoimeen. Palot voidaan jaotella palon kehittymisen kannalta neljään luokkaan. (Hietaniemi 2007, s. 19-20.)

Hidasta palonkehittymistä kuvataan ajan t_g -arvolla 600 s tai sitä suuremmalla arvolla. Esimerkiksi muovituolikatson palo kuvaa tällaista tilannetta (Hietaniemi 2007. s. 34). Normaalista palonkehittymistä kuvaa aika $t_g = 300$ s, josta esimerkkinä normaalin henkilöauton palo (Hietaniemi 2007. s.69). Nopea palonkehittyminen $t_g = 150$ s vastaa esimerkiksi seiväshyppypatjan palo (Hietaniemi 2007. s. 26). Erittäin nopea palonkehittyminen kuvataan puolestaan t_g :n arvolla 75 s, joista esimerkkinä voisi olla kuorma- ja linja-autojen palot (Hietaniemi 2007. s. 72-76) tai neljän toimistotyöpisteen palo (Hietaniemi 2007. s. 89). (Hietaniemi 2007. s.19-20.)

Taulukko 3. Palotehon kehittyminen.

Palon kehittyminen	t_g -arvo	Esimerkkitapaus palosta
Hidas	n. 600 s	Varastorakennus, jossa vähän palavaa materiaalia (TRY 2004, s. 23) Jääkaappi-pakasti (s. 98), muovituolikatso (s. 40-43)
Normaali	n. 300 s	Asuinrakennus tai toimisto (TRY 2004, s. 23) Normaali henkilöauto (s. 69), reilusti pehmustettu muovituolikatso (s. 44)
Nopea	n. 150 s	Kauppa tai puutavaravarasto (TRY 2004, s. 23), Seiväshyppypatja (s. 26), elintarvikehylly, vaatenaulakko 300kg (s. 104), messukoju (s. 53), näyttämö (s. 55)
Erittäin nopea	n. 75 s	Kemian tehdas tai alkoholivarasto (TRY 2004, s. 23) Kuorma- tai linja-auto (s. 72-76), Jätekatos (s. 133)

3.3.2 Polttoaineen rajoittama palo

Tässä työssä käsitellään polttoaineen rajoittamaa paloa ja sen maksimipalotehoa, mutta paloa voi rajoittaa myös hapensaanti. Täysin kehittyneen palon palotehoa pystytään arvioimaan yhtälöllä (6), jossa maksimipaloteho Q_{max} määritetään palavan kohteen tuottaman palotehon pinta-alayksikköä kohti esittävän arvon Q'' ja palavan kohteen pinta-alan A_f tulona. Kirjallisuudesta löytyy Q'' -arvoja eri materiaaleille. Tyypillinen arvo esimerkiksi huonekalujen pehmusteissa käytettävästä palosuojaamattomasta PU-muovista on $200 - 500 \text{ kW/m}^2$. Puun tasaiselle palamiselle arvo on $100 - 150 \text{ kW/m}^2$ ja öljyaltaan palamiselle n. 2000 kW/m^2 . Kaavassa esiintyvä aika t_2 kuvaa palon hiipumisvaiheen alkamisajanhetkeä ja ajanhetkeä t_1 , jolloin kasvuvaihe loppuu. Arvot on määritetty kartiokalorimetrikokeiden tuloksista. (Hietaniemi 2007, s. 20-21.) Täysin kehittyneen palon palotehon arvioiminen yhtälöllä

$$Q(t) = Q_{max} = Q'' * A_f, \text{ kun } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (6)$$

missä Q_{max} on maksimipaloteho [kW],

Q'' on palavan kohteen tuottama paloteho pinta-alayksikköä kohti [kW/m^2],

A_f on palavan kohteen pinta-ala [m^2],

t_1 on ajanhetki, jolloin kasvuvaihe loppuu [s] ja

t_2 on ajanhetki, jolloin hiipuminen alkaa [s].

Tässä työssä käytetään yleisempää potenssimuotoa t^p , kuten palotehoa määritettäessä. Palon kasvuvaiheen loppumisen ajanhetkeä kuvataan tällöin yhtälöllä 7 (Hietaniemi 2007, s. 21) seuraavasti

$$t_1 = t_0 + t_g * \left(\frac{Q_{max}}{Q_0} \right)^{\frac{1}{p}}, \text{ uudempi mallinnustapa } (7)$$

missä t_0 on ajanhetki, jolloin paloteho alkaa kasvaa voimakkaasti [s],

t_g on aika, joka kuluu palotehon kasvamisen alkamisesta hetkeen, jolloin paloteho saavuttaa arvon 1 W [s],

Q_{max} on maksimipaloteho [kW],

Q_0 on vakio, jonka arvoksi on valittu 1000 kW ja

p on potenssilakimallin potenssi.

3.3.3 Jäähdytysvaihe

Polttoaineen käydessä vähiin paloteho laskee sen suurimmasta arvosta. Tällöin oletuksena on yleisesti, että palokuormasta on palanut 60 – 80 % hiipumisvaiheen alkaessa. Standardissa SFS-EN 1991-1-2 esitetään, että 70 % palokuormasta on kulunut hiipumisvaiheen alkaessa, jolloin se alkaa vähenemään lineaarisesti, kunnes palokuorma on kokonaan palanut. Hiipuvan palotehon aikariippuvuus kuvataan lineaarisesti tai eksponentiaalisesti vaimenevana funktiona. Lineaarisessa funktiossa t_3 on palon päättymishetki. (Hietaniemi 2007. s.22.) Palon hiipumisvaihe lineaarisesti lasketaan kaavalla

$$Q(t) = Q_{max} * \left(1 - \frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right), \text{ kun } t_2 \leq t \leq t_3 \quad (8)$$

missä Q_{max} on maksimipaloteho [kW],

t_1 on ajanhetki, jolloin kasvuvaihe loppuu [s],

t_2 on ajanhetki, jolloin hiipuminen alkaa [s] ja

t_3 on ajanhetki, jolloin palo loppuu [s].

Eksponentiaaliseen hiipumiseen eroaa edellisestä, sillä tässä muodossa täytyy määrittää hiipumisvakio τ , ennen kuin eksponentiaalinen hiipuminen lasketaan kaavalla

$$Q(t) = Q_{max} * \exp\left(-\frac{(t-t_2)}{\tau}\right), \text{ kun } t_2 \leq t \quad (9)$$

missä Q_{max} on maksimipaloteho [kW],

t_2 on ajanhetki, jolloin hiipuminen alkaa [s] ja

τ on aikariippuvuuden aikavakio [s]. (Hietaniemi 2007, s.22.)

Palokuorman määrän perusteella voidaan arvioida palonkestoaikaa, jos tunnetaan palon kasvunopeus ja maksimipaloteho. Paloon osallistuvan materiaalin sisältämä palossa vapautuva lämpöenergia Q määrittää palotehon ajallisen riippuvuuden kuvaajan integraalina yli koko palonkestoajan. Lämpöenergian määrän voi arvioida kahdella eri tavalla. Yhtälöön (10) haetaan tilastoista tai muista luotettavista tiedonlähteistä kohteeseen sopiva palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohti ja kerrotaan se kohteen lattiapinta-alalla. Toinen vaihtoehto on määrittää kohteessa käytettävät materiaalit ja massat. Eri materiaalien muodostama kokonaispalokuorma saadaan laskemalla materiaalien massojen ja niiden tehollisten lämpöarvojen tulo. (Hietaniemi 2007, s.22.) Yhtälö (10) on

$$Q = q * A_f \quad (10)$$

missä q on palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohti [MJ/m²] ja

A_f on palavan kohteen pinta-ala [m²].

Palotehon ajallisen kehittymisen kuvaajaan vaikuttavat tekijät ovat palon kasvunopeus, maksimipaloteho, palossa vapautuva kokonaislämpöenergia ja hiipumisen aikana vapautuva lämpöenergia. Esimerkiksi lähteessä (Hietaniemi 2007) on esitetty tuotteiden ja muiden palavien kohteiden palotehotietoja tyyppillisten esiintymiskohteiden mukaan.

3.4 Paikallisen palon mallit

Parametrusten palojen lämpötila-aikakäyriä voidaan käyttää, kun palotilan lattiapinta-ala on alle 500 m² ja tilan korkeus on 4 m. Menetelmällä voidaan ottaa huomioon seinien aukot, mutta katossa sijaitsevia aukkoja sillä ei voida huomioida. Palokuorma oletetaan palavan kokonaan. Jos parametrusten palojen reunaehdot eivät täyty, pitää siirtyä muihin

menetelmiin. Jos palokuorman tiheys on määritetty ilman harkintaa palokäyttäytymisestä, tällöin tapauksessa lähestymistapa pitäisi rajoittaa palotilaan, joiden palokuorma koostuu selluloosan tyyppisestä palokuormasta. (SFS-EN 1991-1-2, s. 50.) Muissa tapauksissa käytetään paikallisen palon malleja.

Olosuhteista huolimatta jokainen rakennuspalo alkaa paikallisena palona ja pysyy sellaisenaan lieskahdukseen saakka. Paikallinen palo voi aiheuttaa huomattavaa vahinkoa rakenteeseen, riippuen rakenteesta ja palon sijainnista. (Franssen 2010, s. 32.) Standardin SFS-EN 1991-1-2 kohta 3.3.1.3 tarjoaa mahdollisuuden ottaa huomioon paikallisen palon aiheuttamat rasitukset, jos lieskahtaminen ja sitä seuraava täyden palon vaihe on epätodennäköistä. Standardin opastava liite C antaa keinoja paikallisten palojen aiheuttamien lämpörasitusten laskentaan. Lausekkeiden väliset erot syntyvät liekin korkeuden suhteesta huonekorkeuteen. Heskestadin mallissa palo voidaan laskea tilanteelle, jossa liekki ei törmää kattoon tai se on avoimessa tilassa. Hasemin mallin mukaisesti liekki törmää kattoon ja se leviää katon pinnan mukaisesti (SFS-EN 1991-1-2, s. 70-72). Muita paikallisen palon keinoin tarkasteltavia palotilanteita on pilari liekin sisällä tai pilari/palkki kuumakerroksessa ja pilari liekin ulkopuolella.

Paikallinen palo pitää valita siten, että se muodostaa tarkasteltavan kohteen kannalta epäedullisimman kuormituksen tarkasteltavaan rakenteeseen. Vaakarakenteiden lämpökuormitus palon yläpuolella riippuu rakenteiden etäisyydestä liekkeihin. Menetelmät ovat yksinkertainen laskentatyökalu paikallisen palon vaikutusten arviointiin. (TRY 2004, s.49.) Paloturvallisuussuunnittelija huomioi rakennuksen tilan geometrian, palokuorman, uhkakuvat ja alkupalojen arvioinnin, tilan materiaalit, aktiivisten järjestelmien vaikutuksen sekä reunaehdot ja rajapinnat. Jos nämä rakennuksen ominaisuudet huomioon ottaen pystytään osoittamaan siten, ettei lieskahdusta tapahdu, käytetään paikallisen palon mallia. Tällöin suunnitelmiin sisältyy paikallisen palon uhkakuvien määrittäminen, yleissyttymisoletuksen tarkastus ja riittävän luotettavuuden osoittaminen. (RIL 195-1-2018 s. 56.)

3.5 Vyöhykemallit

3.5.1 Yleistä

Kehittyneet palomallit ottavat huomioon kaasun ominaisuudet sekä massan ja energian vaihtumisen. Näiden palomallien laskennassa käytetään yhtä kolmesta eri mallista. Yksivyöhykemallissa koko palotilassa olevan lämpötilan oletetaan olevan ajasta riippuva. Kaksivyöhykemalli koostuu puolestaan kahdesta kerroksesta, joista alemmassa puhtaan ilman kerroksessa lämpötila on matalampi kuin ylemmässä kuumien palokaasujen kerroksessa, jonka paksuus ja paikasta riippumaton lämpötila muuttuu ajan mukana. Alempi kerros on paikan suhteen vakio ja sen lämpötila on ajasta riippuva. Kaksivyöhykemallin ja paikallisen palon mallin tulokset yhdistämällä saadaan laskettua paikallisessa palossa rakenneosan eri kohdissa esiintyvät lämpötilajakaumat. (SFS-EN 1991-1-2, s. 44.)

Vyöhykemallit tarvitsevat lähtötiedoiksi rakennuksen geometriasta tilan dimensiot, aukot ja väliseinät, rajoittavien pintojen termiset ominaisuudet ja mitoituspalon tiedot, jotka ovat lämmönvapautumisnopeus, paloteho ja palamislämpö (TRY 2004, s. 49-50). Aukot ovat suuressa roolissa, koska ilma antaa palolle lisää happea ja aukot voivat tyhjentää osastoa kaasuista. Aukot voidaan mitoittaa ja sijoittaa paikoilleen malliin seiniin ja kattoon. Niille voidaan määrittää aika, jolloin ne muuttuvat aukoiksi esim. savunpoistoluukku tai jossain tietyssä lämpötilassa ikkunan hajoaminen. Lisäksi pakotettu ilmanvaihto on mahdollista huomioida. Seinien absorboima energia tärkeä ja seinien kerrospaksuuden ja ominaisuudet voidaan määrittää malliin. (Franssen 2010, s. 29-31.) Lämpötilakehityksen lisäksi mallit laskevat seinien lämpötilat ja kaasun virtaukset aukoista (TRY 2004, s. 49-50).

Kaksivyöhykemalli ei yksinään riitä, kun arvioidaan kokonaistilannetta. Savun määrä osastossa, lieskahduksen todennäköisyys tai suurempi kokonaisuus, kuten alakaton romahtaminen on hyvin arvioitavissa, mutta paikallisen rakenteen käyttäytyminen palon yläpuolella voi kaksivyöhykemallilla johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen. Kaksivyöhykemalli on molemmilta vyöhykkeiltään tasainen lämpötilaltaan, joten se jättää lämpötilahuiput keskiarvoistuksen varjoon ja johtaa liian mataliin lämpötiloihin. Näissä tilanteissa malleja voidaan tutkia yhdessä paikallisen palon mallin yhtälöiden

kanssa, jolloin päästään todenmukaisempaan tulokseen. (TRY 2004, s. 49, 51-52.) OZone-ohjelmistossa on mahdollista tarkastella kaksivyöhykemallin ja yksivyöhykemallin yhdistelmää ja erikseen vielä paikallisen palon vaikutuksia.

Paikallisen palon malleja ja 2-vyöhykkeen malleja voidaan soveltaa paloon ennen lieskahdusta (TRY 2004, s. 48-50, 52). Tietokoneohjelmistoja on saatavilla ilmaiseksi esimerkiksi Yhdysvalloissa National Institute of Standards and Technology (NIST) toimesta kehitetty CFAST ja Liegen yliopistossa Belgiassa kehitetty OZone. (Franssen 2010, s. 29-31.)

3.5.2 OZone

OZone on Belgialaisen Liegen yliopiston kehittämä palosuunnittelun laskentaohjelma rakennusosille. Se on ilmaisohjelmisto ja se on ladattavissa ArcelorMittalin internet-sivuilta. OZone on käyttäjäystävällinen ohjelmisto, joka on kehitetty laskemaan lämmönkäyttäytymistä palavassa tilassa. Sillä voidaan luoda palotilanne ja tarkastella lämpötilankehitys teräsrakenteessa käyttämällä luonnollisen palon käyriä tai luonnollisen palon malleja, jotka pohjautuvat fysikaalisiin ja kemiallisiin parametreihin. Ohjelmistossa voi valita paikallisen palon ja palo-osastoidun palon. (OZone V3 user manual, s. 2.)

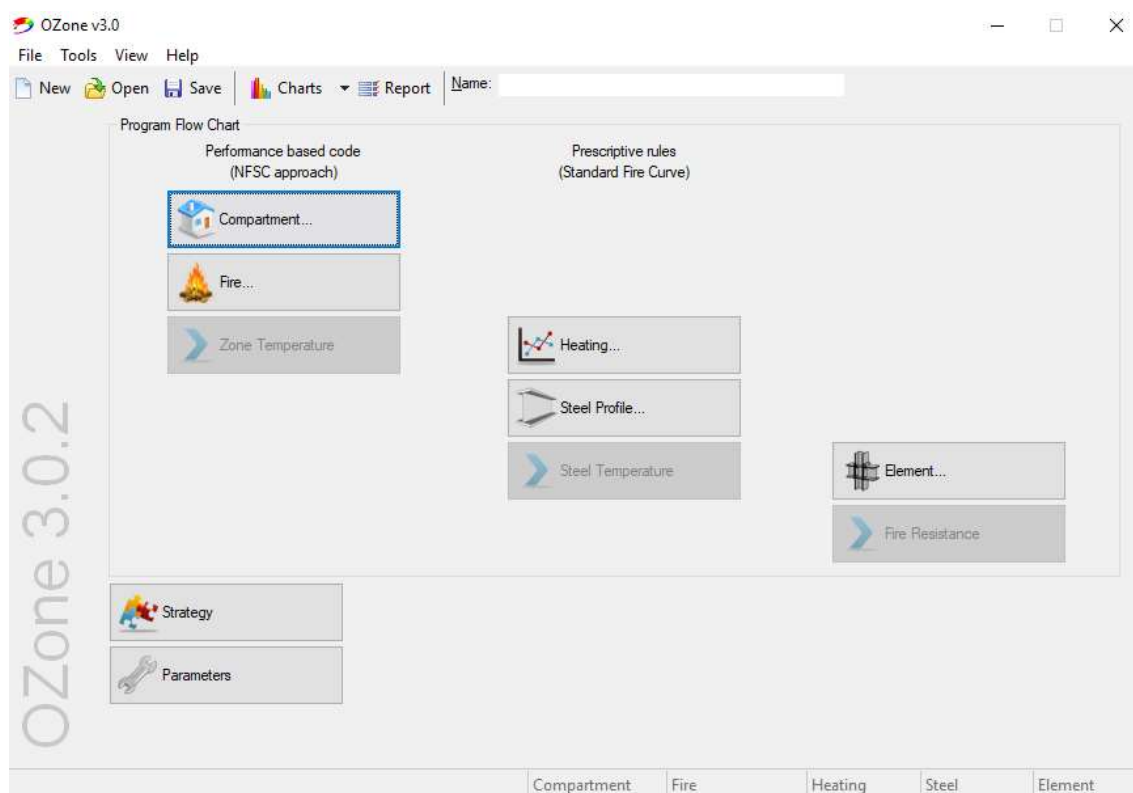
Palo-osastoidussa tilanteessa OZone käyttää yksi- tai kaksivyöhykemallia, jotka on esitetty standardissa SFS-EN 1991-1-2. Voidaan myös asettaa ehto, jonka täyttyminen vaihtaa esimerkiksi kaksivyöhykemallista lieskahtaneessa tilanteessa yksivyöhykemalliin. Palotapaukset voidaan sijoittaa palo-osastoon tai paikalliseksi paloksi. Palo-osastoon voidaan määrittää sen geometria, seinärakenne, katto ja lattia, aukkojen ja ikkunoiden dimensiot ja positiot. Paikallinen palo voidaan määrittää suoraan esittämällä se avoimessa tilassa tai osaston sisällä. Laajoissa osastoissa, joissa lieskahdusta ei tapahdu rakenteen analysointi pitää tehdä paikallisen palon olosuhteissa. (OZone V3 user manual, s. 2.)

Vyöhykemallit ovat numeerisia työkaluja, joilla voidaan arvioida kaasun lämpötilankehitystä osastoidussa tilassa palon aikana. Rajoitettu määrä olettamuksia tekee ohjelmasta helpon käyttää ja tarjoaa hyvän arvion lämpötilankehityksestä. Ensimmäinen numeerinen yksivyöhykemalli on kehitetty vuonna 1995. Sen myötä

useamman vyöhykkeen mallit ja monen osaston palot sekä laskennallista virtausdynamiikkaa käyttävät ohjelmistot ovat kehittyneet. Vyöhykemallit eivät ole monimutkaisia, mutta paloturvallisuussuunnitteluun ne ovat tärkeitä alan sovelluksia. (OZone V3 user manual, s. 2.)

OZoneen voi syöttää tarkasteltavan teräsrakenteen profiilin tiedot. Suojaamaton/suojattu rakenne, profiili, rakenteen ympäröivä paloaltistus sekä tarvittaessa yksityiskohtaisempia tietoja. Ohjelma laskee teräsrakenteen poikkileikkauksen tasaisen lämpötilajakautuman myötä teräsrakenteen lämpötilan nousun sille määritetyillä arvoilla standardin EN 1993-1-2 mukaisesti. (OZone V3 user manual, s. 27.) OZone on tehty helpoksi ja nopeaksi insinöörin työkaluksi. OZonen manuaalin mukaan ohjelmisto on vahvistettu useiden testien ja virtausdynamiikkaa hyödyntävien ohjelmistojen toimesta (OZone V3 user manual, s.2).

Kuva 3. OZone käyttöliittymä.



3.5.3 ELEFIR-EN

ELEFIR-EN pohjautuu OZoneen ja se on Belgialaisen Liegen yliopiston kehittämä palosuunnittelun laskentaohjelma teräsrakennusosien palonkestävyyden laskentaan.

Ohjelma on valmistunut alun perin 1990-luvun lopulla, mutta on myöhemmin päivitetty Eurokoodien 1 ja 3 pohjalle yksinkertaisten palosuunnittelun sääntöjen mukaiseksi. Päivityksestä vastasi portugalilainen Aveiron yliopisto, joka lisäsi ohjelmaan standardien EN 1991-1-2 ja EN 1993-1-2 uudet versiot. ELEFIR-EN:llä pystyy laskemaan eurokoodin mukaisia palon vaikutuksen alaisia yksinkertaisia rakennelaskelmia. Se on rakennesuunnittelijalle hyödyllinen työkalu nopeaan ja tarkkaan laskentaan, minkä vuoksi se on suunnitteluaikaa säästävä ja virheiden määrä pienenee. Se sopii myös akateemiseen käyttöön ja opiskelijoille. Ohjelmaan ei ole olemassa käyttöohjetta, mutta ostamalla Jean-Marc Franssenin ja Paulo Vila Realin kirjoittaman kirjan ECCS ”Eurocode Design Manuals Fire Design of Steel Structures” saa lisenssin ELEFIR-EN-ohjelmaan. Kirjassa on esitelty ohjelmaa lyhyesti esimerkin avulla. (Franssen 2010, s. 267-268.)

Paloturvallisuussuunnittelija tai rakennesuunnittelija voi itse määrittää palon ja lisätä sen ohjelmaan samaan tapaan kuin OZonella, minkä jälkeen voidaan tutkia rakennusosan palonkestävyyttä ajan, lujuuden ja lämpötilan suhteen. Teräksestä tai ruostumattomasta teräksestä valmistetun profiilin valinta on useimmille tyypillisille poikkileikkauksille, mutta myös käyttäjäkohtainen valinta voidaan suorittaa. Paloaltistuksen voi valita ja passiivisen palosuojauksen voi lisätä rakenneosalle. Palo voi olla standardipalokäyrä, hiilivetykäyrä, parametrinen palokäyrä, paikallinen palo tai käyttäjän määrittämä. Palon parametrit, aukot ja pinnat lisätään malliin samanlaisella käyttöliittymällä kuin OZonessa, joka on kehitetty myös Liegen yliopistossa. Rakenteiden laskennassa voi valita jännitetyt, puristetut, leikkaus, taivutetut tai näiden yhdistelmänä olevat rakenteet. Myös momentin voi lisätä malliin. Ohjelma laskee profiilin tietojen, kuormitusten ja palon perusteella palotilan ja teräsrakenteen lämpötilan kehittymisen. (Franssen 2010, s. 267-292.)

3.6 Palosimulointi

3.6.1 PyroSim / FDS

Palotapahtuma on monimutkainen yhdistelmä fysikaalisia ilmiöitä, joten yksinkertaisia lähestymistapoja ei voida aina käyttää. Tällöin pitkälle kehitetyt ohjelmistot, jotka perustuvat laskennalliseen virtausdynamiikkaan ovat parhaita käytössä olevia ohjelmia

mallintamaan palotilannetta suunnittelijalle. Yksi- ja kaksi-vyöhykemallien lisäksi kolmas käytettävissä oleva malli soveltaa laskennallista virtausdynamiikkaa, jota hyväksi käyttäen palotilan lämpötilakehitys voidaan selvittää ajasta ja paikasta riippuvalla tavalla. Laskennallista virtausdynamiikkaa soveltavat mallit ovat kaikkiin mahdollisiin palotapahtumiin, mukaan lukien täysin kehittyneet palot, paikalliset palot, monimutkaisten geometrioiden rakennukset ja palot rakennusten ulkopuolella. (SCI 2018, s. 7.)

Yhdysvaltain kauppaministeriön alainen virasto National Institute of Standards and Technology NIST kehittää ja edistää mittaustekniikoita, standardeja ja tekniikkaa. FDS on kehitetty tämän viraston alaisuudessa. Se simuloi palotilanteita käyttämällä laskennallista virtausdynamiikkaa eng. Computational Fluid Dynamics CFD ja on optimoitu hitaalle nopeudelle ja lämpövetoiselle virtaukselle. Lähestymistapa on erittäin joustava ja voidaan määrittää esimerkiksi liesiä tai öljysäiliöitä. (Hostikka ym. 2019, s.3.) Mallinnettavassa osastossa ratkaistaan Navier-Stokesin yhtälöt. Ne jaetaan osastossa suureen määrään soluja, joissa Navier-Stokes yhtälöt kirjoitetaan ja ratkaistaan. Ne tuottavat tietoa esimerkiksi paineen, lämpötilan, nopeuden sekä kemikaalien komponenteista. Tulipalojen tarkka jäljentäminen on erittäin hankalaa ja mallien valikoima voi olla suuri. Asiantuntijan tehtävänä on valita huolellisesti kohteelle sopiva malli. (SCI 2018, s. 7.) Niiden käyttö edellyttää erityisesti siihen tarkoitettua ohjelmistoa, tehokkaita tietokoneita ja koulutettua sekä kokeneita käyttäjiä (Franssen 2010, s.31). Fire Dynamic Simulator FDS on yleisin Computational Fluid Dynamics-mallinnusta hyödyntävä ohjelmisto.

PyroSim on graafinen käyttöliittymä Fire Dynamic Simulator FDS-ohjelmistolle. FDS on integroitu tiiviisti PyroSim-järjestelmään. Savua, lämpötilaa, häkää ja muita palossa vapautuvia aineita on mahdollista tutkia ohjelmiston avulla. Simulaation tuloksia voidaan käyttää rakennusten turvallisuuden tutkimiseen suunnitteluvaiheessa, määrittämään turvallisuusratkaisuja olemassa olevissa rakennuksissa, onnettomuuksien jälkeiseen tutkimukseen uudelleenrakentamisvaiheessa ja apuna palomiesten koulutuksessa. (Hostikka ym. 2019, s. 3.) CFD-mallinnusta hyödyntävät ohjelmistot ovat vyöhykemallia kehittyneempiä. Laskennalliseen virtausdynamiikkaan perustuvat palosimulointiohjelmat ovat vuosi vuodelta suosittumaksi paloturvallisuussuunnittelussa.

3.6.2 SAFIR

Elementtimenetelmää hyödyntävällä maksullisella SAFIR-tietokoneohjelmalla voidaan mallintaa rakenteiden käyttäytymistä tulipalotilanteissa. Liegen yliopistossa Belgiassa kehitetyllä ohjelmalla voidaan luoda 2D- tai 3D-malleja käyttämällä lineaarisia elementtejä, tasoelementtejä ja tilavuuselementtejä. Näillä voidaan luoda ja ratkaista palkkeja, pilareja, laattoja ja seiniä sekä niiden liitoksia koskevia tapauksia. Materiaaleina voidaan käyttää terästä, betonia, puuta, alumiinia ja kipsiä, mutta käyttäjä voi syöttää myös omia materiaalimalleja esimerkiksi palossa käytettävälle eristeelle. SAFIR-analyysin prosessi alkaa syöttämällä palon tiedot. Ohjelma laskee lämpötilan rakenteen poikkileikkauksessa. Kohonneen lämpötilan seurauksena se laskee syntyvän mekaanisen vasteen huomioiden myös lämpölaajenemisen sekä lujuuden ja jäykkyyden pieneneminen materiaalissa. (University of Liege 2015, s. 3.)

Palotilanne voidaan luoda käyttämällä standardipaloa tai mitä tahansa aika-lämpötilakäyrää. Paikallisella palolla on mahdollista tutkia palkki- tai kattorakenteita standardin EN 1991-1-2 liitteen C mukaisesti. Myös pilareiden paikallisen palon tarkastelut ovat mahdollisia. Palosimulointi voidaan tehdä myös Fire Dynamic Simulator-ohjelmalla ja tuoda sieltä tietoa SAFIR-ohjelmaan. (University of Liege 2015, s. 4.) SAFIR on käytössä ympäri maailmaa ja Suomessa sillä on tehty mm. Helsingin olympiastadioniin toiminnallista tarkastelua (Salminen ym. 2015).

3.7 Lämmönsiirtyminen teräsrakenteisiin

3.7.1 Teräs

Valuraudan hiilipitoisuus on yli 1,7 %. Sen vuoksi sitä on helppo valaa ja se kestää hyvin puristusta, mutta on haurasta ja kovaa materiaalia, joten se ei kestä vetoa niin hyvin. Valuraudasta valmistetut kappaleet ovat raskaita, eikä niitä voi muovata ja niitä on hankala työstää. Korkeissa lämpötiloissa sen tilavuus kasvaa, mutta jäähtymisvaiheessa se ei palaudu. Hiilipitoisuuden ollessa alle 1,7 %, kutsutaan sitä teräkseksi. Ominaisuudet ovat pienemmillä hiilipitoisuuksilla erilaisia ja mekaanisia ominaisuuksia voidaan säätää koostumuksella ja valmistusprosesseilla. Teräslajeja onkin olemassa tuhansia erilaisia. (TKK 2007, s. 24-27.)

Teräksen paikallinen lämmön nousu saattaa aiheuttaa jännityksiä ja halkeamia. Rakentamisessa käytettävät teräket ovat perusteräksiä, ilmastokorroosiota kestäviä ja ruostumattomia teräksiä. Suuri lujuus tekee teräksestä erilaisen verrattuna esimerkiksi tiileen, betoniin tai puuhun. Teräket ja metallit yleensä johtavat lämpöä ja sähköä hyvin, minkä lisäksi ne ovat palamattomia aineita, mutta pehmenevät korkeissa lämpötiloissa ja lämpölaajeneminen synnyttää nopeasti muodonmuutoksia. Lujuusominaisuudet teräksessä riippuvat merkittävästi lämpötilasta. Lämpötilan noustessa teräs pehmenee ja voi menettää kantokyvyn yllättävän varhaisessa vaiheessa jopa 10-20 minuuttia tulipalon syttymisestä. Myös pitkäaikaisen kuumuuden yli 400 °C:ssa, johtaa rakenteen virumiseen. Kriittinen lämpötila rakenteiden mitoituksessa on yleisesti 600 °C, mutta se on tapauskohtainen. Teräsrakenne menettää lujuuden kokonaan 1000 °C:n lämpötilassa. Lämpötilan laskiessa teräs kovenee ja haurastuu. Se voi myös kestää huonommin korroosiota, sillä yli 500 °C:n lämpötiloissa teräksen pinta hapettuu ja alkaa hilseilemään. (TKK 2007, s. 27-29.)

3.7.2 Lämmönsiirtyminen

Lämmön siirtyminen tapahtuu johtumalla, kuljettumalla tai säteilemällä korkeammasta lämpötilasta matalampaan, kunnes lämpötilaero on tasoittunut. Johtumalla siirtyvä lämpö on aineen molekyylien värähtelyä kuumemmasta kylmempään. Tiheä aine johtaa monissa tapauksissa paremmin lämpöä ja niitä kutsutaan lämmönjohteiksi, joista esimerkkinä ovat metallit. Lämmön johtumista hankaloittavat lämpöeristeet, kuten esimerkiksi ilma, villa tai vesi. (Hyttinen ym. 2014, s. 71-72.) Aineen sisäisen energian kaasui- tai nestevirtauksen tai liikkuvan kappaleen mukana siirtyvän lämmön ilmiö on kuljettumista eli lämmön konvektion välityksellä tapahtuvaa lämmön siirtymistä. Esimerkkitapauksena tällaisesta ilmiöstä on kuumen savun siirtyminen palavasta huoneesta toiseen ja aiheuttaen palon leviämisen. Myös ilmapirran mukana leviävä nuotion kipinä voi siirtää lämpöä ilmapirran välityksellä etäälle nuotiosta. (Hyttinen ym. 2014, s. 74-75.)

Säteilemällä siirtyvä lämpö siirtyy sähkömagneettisena säteilynä. Se on kuumen kappaleen tai pinnan säteilemää energiaa. Lämpösäteily ei käytä väliainetta lämmön siirtämiseen, eikä se lämmitä ilmaa. Lyhyen etäisyyden lämpösäteily ei heikkene ilman jäädyttävästä vaikutuksesta. Kappaleen pintaan osunut sähkömagneettinen säteily

muuttuu lämmöksi. Pinnan laadulla on vaikutusta kappaleen emissiviteettiin eli kykyyn lähettää lämpösäteilyä. Absorptiokyky tarkoittaa kykyä vastaanottaa lämpösäteilyä. Teoreettisen ääripään muodostaa musta kappale, joka ei heijasta lämpösäteilyä, imee kaiken siihen kohdistuvan lämpösäteilyn ja lähettää lämpösäteilyä muita kappaleita paremmin. Valkea kappale ei ime mitään säteilyä itseensä ja heijastaa kaiken siihen kohdistuvan lämpösäteilyn. Valkoisen ja mustan kappaleen välille voidaan asettaa kaikki todelliset kappaleet, joiden säteily on pienempää verrattuna mustaan kappaleeseen. Emissiokerroin ϵ kuvaa kappaleen lähettämän lämpösäteilytehon suhdetta yhtä suuren lämpötilan omaavan mustan kappaleen lähettämään säteilytehoon. (Hytinen ym. 2014, s. 76-78.) Adiabatic surface temperature AST on käytössä teräsrakenteilla, kun pinnan kaasun lämpötilaa voidaan käyttää teräsrakenteen lämpötilana laskennassa (Wickström ym. 2007).

3.7.3 Laskelmat

Rakenneosien pitää täyttää R-ehto standardipalon tilanteessa. Ehto täyttyy, kun kantavuus säilyy vaaditun ajan paloaltistuksessa. Parametrisessä paloaltistuksessa rakenteen kantavuus on riittävä siinä tapauksessa, jos sortumista ei tapahdu koko tulipalon aikana sekä palon hiipumisvaiheessa tai vaaditun ajan kuluessa. (SFS-EN 1993-1-2, s. 17.)

Teräsrakenteille kantavuus tulipalotilanteissa lasketaan kaavalla

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (11)$$

missä $E_{fi,d}$ Standardin SFS-EN 1993-1-2 mukainen mitoitusarvo kuormien vaikutuksista palomitoitustilanteessa ja

$R_{fi,d,t}$ Ajan hetkellä t mitoitusarvo teräsrakenneosan kestävyydelle.

Mitoitusarvo $R_{fi,d,t}$ ajan hetkellä t määritetään ottamalla huomioon teräksen mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa. Standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaiset normaalilämpötilassa lasketut arvot muunnetaan vastaamaan palotilannetta. Standardin kohdan 4.2.3 vaihtoehtoinen laskentatapa on määrittää rakenteen kriittinen lämpötila. Tarkasteltavissa tilanteissa, joissa stabiiliutta tai siirtymätilaehtoja ei tarvitse huomioida,

hiiliteräksen kriittisen lämpötilan voi laskea kaavasta (12), jossa arvon μ_0 täytyy olla vähintään 0,013. (SFS-EN 1993-1-1, s. 26, 34.) Lähes aina tätä ei kuitenkaan voida käyttää suoraan, sillä usein teräsrakenne voi menettää stabiiliutensa. Kriittinen lämpötila lasketaan kaavalla

$$\theta_{a,cr} = 39,19 * \ln \left(\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (12)$$

missä $\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$ ja

$\theta_{a,cr}$ on hiiliteräksen kriittinen lämpötila [°C].

Poikkileikkausluokkaan 1, 2 tai 3 kuuluvat sauvat ja kaikki vedettyjen sauvat. Hyväksikäyttöaste μ_0 hetkellä $t=0$ voidaan laskea kaavalla

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (13)$$

missä

$R_{fi,d,0}$, $R_{fi,d,t}$:n arvo hetkellä $t=0$, standardin SFS-EN 1993-1-2 kohdan 4.2.3 mukaan ja

$E_{fi,d}$, $R_{fi,d,t}$ määritetään standardin SFS-EN 1993-1-2 kohdan 4.2.1(1) mukaan.

Vedetyille sauvoille ja palkeille, joilla kiepahdus ei ole potentiaalinen murtumismuoto, varmalla puolella oleva μ_0 lasketaan kaavan (14) mukaisesti

$$\mu_0 = \eta_{fi} * \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

missä μ_0 on hyväksikäyttöaste,

η_{fi} on pienennystekijä (SFS-EN 1993-1-2 2.4.3(3)),

$\gamma_{M,fi}$ on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku palotilanteessa ja

γ_{M0} on osavarmuusluku.

Teräksen lämpötilan kehittymistä tarkastellaan tässä työssä suojaamattoman, sisätilassa olevan teräsrakenteen kannalta, mutta vastaavanlainen menetelmä on olemassa myös suojatulle rakenteille. Poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilajakauma. (SFS-EN 1993-1-1, s. 35.) Suojaamattoman terässauvan lämpötila lasketaan yhtälöstä

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{\frac{A_m}{V}}{c_a * \rho_a} * h_{net} * \Delta t \quad (15)$$

missä

k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjauskerroin,

A_m/V on poikkileikkaustekijä [$1/m$],

A_m on sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m^2/m],

V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m^3/m],

c_a on teräksen ominaislämpö 600 J/kgK yksinkertaistettu arvo (TRY N:o 13/2000, s. 7) Eurokoodissa lämpötilariippuva arvo, jolla voidaan myös laskea.

ρ_a on teräksen tiheys [kg/m^3],

Δt on aikaväli [s],

h_{net} on pinta-alan yksikköä kohden laskettu nettolämpövuoto [W/m^2] ja

Rakenneosan lähtölämpötila $\theta_{m,0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pinta-alayksikköä kohti määritetty nettolämpövuon säteilemällä siirtyvä mitoitusarvo konvektion ja säteilyn summana (SFS-EN 1991-1-2, s. 38).

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (16)$$

Netto lämpövuon kuljettumalla siirtyvä osa (SFS-EN 1991-1-2, s. 38) voidaan määrittää kaavalla

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

missä α_c kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$],

θ_g kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneosan lähellä [$^{\circ}\text{C}$] ja

θ_m rakenneosan pintalämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Nettolämpövuon säteilemällä siirtyvä osa pinta-alayksikköä kohden (SFS-EN 1991-1-2, s. 40) voidaan määrittää kaavalla

$$h_{net,r} = \varphi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

missä φ näkyvyyskerroin,

ε_m rakenneosan pinnan säteilykerroin,

ε_f palon säteilykerroin,

σ Stefan-Boltzmann-vakio $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2\text{K}^4]$,

θ_r paloympäristön tehollinen säteilylämpötila [$^{\circ}\text{C}$] ja

θ_m rakenneosan pintalämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Teräsrakenteiden pinta-alan yksikkökohtainen nettolämpövuon mitoitusarvo lasketaan SFS-EN 1991-1-2 mukaisen säteilyn ja konvektion summana:

$$h_{net,d} = \varepsilon_{res} * 5,67 * 10^{-8} * \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] + \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad (19)$$

missä α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin oletus 35 [W/m²K] (SFS-EN 1991-1-2, s. 44),

φ on näkyvyyskerroin yleensä 1,0, mutta sijainti- ja varjostusvaikutusten huomioon ottaen voidaan käyttää pienempää arvoa (SFS-EN 1991-1-2, s. 40),

ε_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin hiiliteräsrakenteille 0,7 ja ruostumattomille teräksille 0,4 (SFS-EN 1991-1-2, s. 40),

ε_f on palon säteilykerroin (yleensä $\varepsilon_f = 1,0$) (SFS-EN 1991-1-2, s. 40),

σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($\sigma = 5,67 * 10^{-8}$ W/m²K⁴) (SFS-EN 1991-1-2, s. 40),

$\Theta_r = \Theta_g$ on paloympäristön tehollinen lämpötila [°C] (SFS-EN 1991-1-2, s. 40),

ε_{res} on resuloiva emissiokerroin arvostaan 0,5 (TRY N:o 13/2000, s. 6)) ja

$\Theta_r = \Theta_m$ on rakenneosan pintalämpötila [°C] (SFS-EN 1991-1-2, s. 38, 40).

Lämpötilan nousun määrittämiseksi tarkoitettu menetelmä sopii sekä hiiliteräksille että ruostumattomille teräksille.

3.7.4 Liitokset

Normaalilämpötilassa tehtävä liitosten mitoitustulo suoritetaan standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisesti. Palonkestävyyttä voidaan arvioida hitsaus- ja ruuviliitoksissa riittäväksi termisen kestävyuden ja liitoksen käyttöasteen perusteella. Normaalilämpötilassa kestävyys ristikon liitoksille lasketaan kestävyuden laskentakaavojen ja geometrinen rajoitusten voimassaolosta. Ristikkoa palomitoitettaessa tarkistetaan liitosten kestävyys käyttämällä palolämpötilan mukaista myötörajaa ja kimmokerrointa.

Geometriarajoitusten voimassaolon tarkastamiseen riittää vain tarkastelu normaalilämpötilassa. Kestävyyden kannalta ei ole merkitystä, vaikka hoikimpien sauvojen $t=4\text{mm}$ kaikki raja-arvot eivät täyty, kun myötöraja ja kimmokerroin muuttuu eri lämpötiloissa. Lisävarmuutta tuo liitosalueen massakeskittymä sekä normaalia suurempi varjostusvaikutus, mitkä osaltaan laskevat liitoksen lämpötilaa noin $20\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. (TRY N:o 13/2000, s. 8.)

Testit ja havainnot ovat osoittaneet, että liitokset käyttäytyvät hyvin palotilanteessa ja useissa tapauksissa ne voidaan jättää palosuojaamatta. Tiedetään, että liitosten lämpötila ei kasva yhtä suureksi kuin muissa rakenneosissa palkkien ja pilareiden varjostuksen vaikutuksesta. Terästä on enemmän paikallisesti liitoksessa ja se kasvattaa näin ollen poikkileikkaustekijää. ECCS:n kirja Model Code on Fire Engineering vuodelta 2001 ehdottaa vähäisempää palonsuojausta käytettäväksi liitoksissa. Myös Eurokoodi 3:n kohdista (SFS-EN 1993-1-2, liite D) liitosten palosuunnittelusta voi tulkita, että jos kiinnitettävät rakenneosat ovat suojaamattomia, niin tällöin myös liitokset voidaan jättää suojaamatta. Tilanteessa, joissa rakenneosa on ylimitoitettu kestäämään palonkestävyysaika huolimatta lisätystä lämpösuojauksesta, myös liitos täytyy olla ylimitoitettu. (Franssen 2010, s. 251-252.)

Liitosten tarkastelussa on huomioitava lämpötilamuutosten aiheuttamat rasitukset korkeissa lämpötiloissa. Välillisiä kuormia aiheuttavat rakenneosien lämpölaajenemisen estyminen, erilaiset lämpölaajenemiset staattisesti määräämättömissä rakenneosissa, poikkileikkauksen sisäiset lämpötilaerot ja palotilan ulkopuolella olevien rakenneosien rasitukset palotilassa olevien rakenneosien lämpölaajenemisen takia. (SFS-EN 1991-1-2, s. 36, 46.)

Liitosten tarkastelu edellyttää rakenneanalyysia, joka voidaan tehdä rakenneosan, rakenteen osien tai rakenteen kokonaistarkasteluna (SFS-EN 1990, s. 68). Rakenneanalyysissä materiaaliominaisuuksien riippuvuus lämpötilasta sekä epäsuorat vaikutukset materiaalin lämpötilalaajenemisen aiheuttamista muodonmuutoksista otetaan huomioon. Rakenteen osan tarkastelussa sekä rakenteen kokonaistarkastelussa otetaan huomioon rakenteen vauriomuoto sekä rakenneosien jäykkyyksien riippuvuus lämpötilasta. Rakenneosan tarkastelussa ainoastaan lämpötilagradientin aiheuttamat

muodonmuutokset huomioidaan ja lämpötilan aiheuttama pituuden muuttuminen voidaan jättää huomioon ottamatta. (SFS-EN 1993-1-2, s. 16-20.)

Kehittyneissä laskentamenetelmissä rakennesuunnittelijan on mahdollista tehdä laskelmia, joissa kiinnitetään huomiota lämpörasituksien, mekaanisten kuormien ja geometristen epätarkkuuksien yhteisvaikutukseen, lämpötilasta riippuviin materiaaliominaisuuksiin, lämpötilan noususta ja lämpötilaeroista aiheutuviin venymiin ja jännityksiin. Myös geometriset epätarkkuudet sekä epälineaaristen materiaaliominaisuuksien vaikutukset sisältäen kuormittamisen ja kuorman poistamisen vaikutukset rakenteen jäykkyyteen. Murtumismuodot, joita käytettävä laskentamenetelmä ei huomioi on syytä varmentaa muilla menetelmillä. (SFS-EN 1993-1-2, s. 39-41)

3.8 Palonsuojausmenetelmät

Palon voidaan olettaa kasvavan, kunnes se muuttuu happirajoitteiseksi, palokuormarajoitteiseksi, sprinkler laukeaa tai palokunta alkaa sammuttamaan paloa. Happi- tai palokuormarajoitteisuus, sprinklerin laukeaminen tai palokunnan palon sammuttaminen voidaan yleensä olettaa keskeyttävän palon kasvun. (RIL 221-2003, B.2.8.1.6.) Seuraavassa käsitellään rakenteellista paloturvallisuutta ja palosuojauksen mahdollisuuksia. Erityisesti tarkastellaan sprinklauksen huomioon ottamista.

3.8.1 Passiiviset palonsuojausmenetelmät

Rakenteiden paloturvallisuuden turvaamiseksi tavanomaisissa rakennuksissa käytetään passiivisia suojausmenetelmiä. Käytännössä ne tarkoittavat ylimitoitusta, palosuojalevyjä tai -eristeitä. Lämpötilan kasvaessa reagoivat palosuojamateriaalit ja rakenteen pintaan asennettavat materiaalit kuuluvat myös passiivisiin palosuojausmahdollisuuksiin. Toiminnallisessa palosuojauksessa huomioidaan sekä passiiviset että aktiiviset menetelmät. Sen avulla rakennuksen olosuhteet, käyttö ja sijainti voidaan ottaa huomioon muita menetelmiä hyödyntäen esimerkiksi simuloimalla palonkehitystä merkittävässä ja suurissa henkilö- ja omaisuusturvallisuuden kannalta vaikeissa rakennuksissa. (Outinen 2013.)

Taulukko 4. Palosuojausmenetelmät ja niiden käyttökohteet (Outinen 2013 mukaillen).

Passiiviset	Aktiiviset	Toiminnallinen
<ul style="list-style-type: none"> - Ylimitoitus - Palosuojaalevyt - Palosuojaeristeet, esim. kivivilla - Reaktiiviset palosuojamaalit - Materiaalit suojattavan rakenteen pinnassa 	<ul style="list-style-type: none"> - Sprinklerit - Savunpoistoluukut - Automaattinen hälytys palokunnalle - Automaattinen paikkatieto palokunnalle - Palokunnan toiminta 	<ul style="list-style-type: none"> - Passiiviset ja aktiiviset menetelmät mukana - Huomioidaan rakennuksen olosuhteet, käyttö, sijainti jne. - Lämpötilojen simulointi
Kohteet <ul style="list-style-type: none"> - Tavanomaiset rakennukset 	Kohteet <ul style="list-style-type: none"> - Merkittävät, suuret rakennukset henkilö- ja turvallisuuden kannalta 	Kohteet <ul style="list-style-type: none"> - Merkittävät, suuret rakennukset henkilö- ja omaisuuden turvallisuuden kannalta

Tässä työssä tarkastellaan palosuojamaalauksen pois jättämisen mahdollisuutta toiminnallisen palomitoituksen keinoin. Palosuojamaalit ovat siis passiivisia palosuojausmenetelmiä. Ne toimivat reagoiden palotilanteessa lämpötilan nousun vaikutuksesta paisumalla, mikä toimii eristekerroksena hidastaen lämpötilanousua teräsrakenteessa. Palonsuojamaalin alla olevaa teräsrakennetta suojaava kerros paisuu noin 40-60 kertaiseksi verrattuna pintaan maalattuun kalvonpaksuuteen. Maali reagoi n. 200 °C lämpötilassa. (TRY 2017, s.6.)

Palosuojamaalauksen toteutuksen vaiheisiin kuuluvat esikäsittely, pohjamaalaus, palosuojamaalaus ja pintamaalaus. Maalausjärjestelmän kokonaispaksuus on noin 0,2 - 5 mm ja teräsrakenteiden suositeltavaksi ainevahvuudeksi annetaan 5 mm palosuojamaalauksella käytettäessä. Palosuojamaalaus soveltuu yleensä R15 - R120 palonkestävyysvaatimusten teräsrakenteille. Käyttöalue tarkistettava tuotekohtaisesti. (TRY 2017, s.6.)

Palosuojamaalauksen suunnitteluun vaikuttavat rakennuksen käyttötarkoitus, ympäristön rasisluokka sekä kuljetus- ja asennusaikaiset sääolosuhteet. Maalin paksuuden mitoittamista varten tarvitaan tieto rakenteen kriittisestä lämpötilasta, poikkileikkaustekijästä ja palonkestoajasta. Maalauksen tarkastus täytyy tehdä kolmen vuoden välein ja mikäli vaurioita havaitaan, ne on korjattava heti. (TRY 2017, s.6.)

3.8.2 Aktiiviset palonsuojausmenetelmät

Aktiivisia palonsuojausmenetelmiä ovat puolestaan sprinklerit, savunpoistoluukut, palokunnan toiminta, sekä automaattisesti palokunnalle hälytyksen välittävä järjestelmä, joka voi sisältää myös paikkatiedot palosta kohteessa. Aktiivisen palonsuojauksen vaatimia kohteita ovat suuret rakennukset sekä henkilö- ja omaisuusturvallisuuden perusteella kriittiset kohteet. (Outinen 2013.)

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta ei anna tarkkoja ohjeita sprinklauksen huomioimiseen muutoin kuin perustelumuiistiossa seuraavasti: ”Automaattisen sammutuslaitteiston luotettavuus tulee ottaa suunnittelussa huomioon tulipalon mahdollisten seurausten mukaisesti: kantavien rakenteiden kestäminen sortumatta riittävän luotettavasti, suurten henkilömäärien altistuminen tulipalolle, uloskäytävien lukumäärän vähentämisen tai mitoituksen vaikutukset, jne.” (Srmk perustelumuiistio 2017, s.43) Sprinklaus voidaan kuitenkin ottaa huomioon ja se voidaan tehdä eri tavoilla. VTT:n mitoituspalokokoelman (Hietaniemi 2007) mukaan mitoituspalon palotehon kasvu keskeytetään hetkellä, jolloin kuumen kerroksen lämpötila palon yläpuolella nousee sprinklerin laukeamisen tasolle. Tässä vaihtoehdossa menetelmät jakaantuvat vielä kahteen osaan. Yhden menetelmän mukaisesti paloteho kaksinkertaistetaan hetkellä, kun sprinklerit laukeavat, minkä jälkeen oletetaan palotehon pysyvän vakiona laskennan loppuun saakka. Toinen vaihtoehto on käyttää mallia, jossa sprinklereiden laukeamishetken jälkeen paloteho alenee eksponentiaalisesti koetuloksiin perustuvien mallien mukaisesti.

Mallien (Madrzykowski & Vettori 1992, Evans 1992, Yu ym. 1994 ja Hamins & McGrattan 1999) määrittämiseen tarvitaan vesivuon mitoitusihteys. Evansin koetulokset perustuvat puurituläpaloista saatuihin tuloksiin. Yu ja Hamins & McGrattan ovat tutkineet sprinklausta käyttämällä polttoaineena polystyreenikuppeja pahvilaatikossa. Madrzykowski & Vettori arvio on konservatiivinen ja sen mittauksulokset ovat muiden yläpuolella oleva käyrä. Edellä esitettyihin koetuloksiin perustuvassa mallissa paloteho alenee sprinklereiden laukeamishetken tp jälkeen seuraavan kaavan mukaisesti (Hietaniemi 2007, s. 135-136):

$$Q(t) = Q(t_p) * \exp(-k * (t - t_p)) \quad (20)$$

missä t_p sprinklerin laukeamishetki [s] ja

k sprinklerin palotehoa alentavan vaikutuksen kuvaamiseen käytettävä tekijä [1/s].

Sprinklereiden palotehon alentava vaikutus kuvataan tekijän k -arvolla, joka vaihtelee eri tutkimusten mukaan. Kyseinen k -arvo riippuu mm. polttoaineesta, vesivuosta ja palotehosta. (Hietaniemi 2007, s. 135-136.) Arvon k määrittämiseen tarvitaan tieto sprinkleriluokasta ja sen vesivuon mitoitustiheydestä. OH-luokan sprinklerille vesivuon mitoitustiheydeksi annetaan 5 mm/min. Sprinkleriluokka valitaan mm. palotilan palokuorman ja palamisherkkyuden perusteella. Työn Case-esimerkissä käytetään OH-luokan sprinkleriä, joka on normaali sprinkleriluokan tuote ja se kattaa palokuormaltaan ja palamisherkkyydeltään normaalit tuotteet ja materiaalit. OH-sprinklerit sijoitetaan tasaisesti 4 metrin etäisyydelle toisistaan. Sprinklerin nimellisenä laukeamislämpötilana käytetään 68°C, joka on valittu olettaen, että se on yli 30 astetta suurempi kuin ympäristön lämpötila. (SFS-EN 12845, s. 24, 68, 99, 100.)

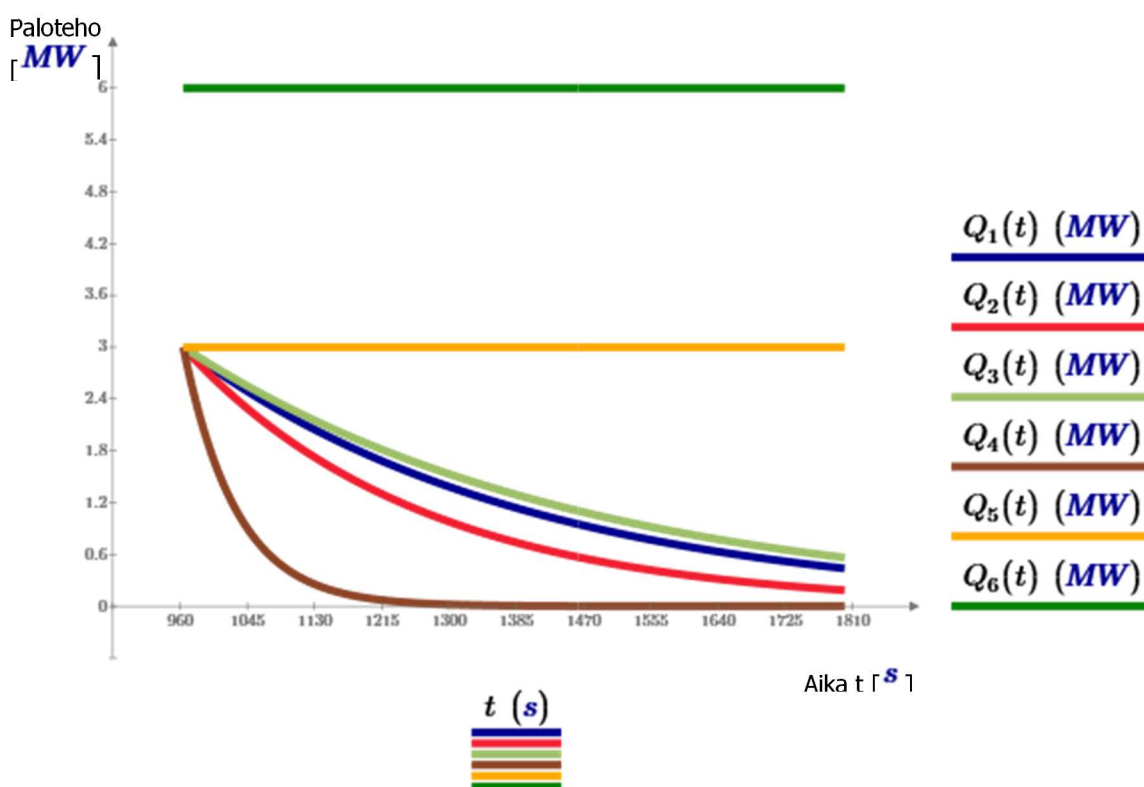
Ruotsin asetuksessa (BFS2013) esitetään, että sprinklerin laukeamishetkellä palotehon ollessa alle 5 MW paloteho pysyy vakiona yhden minuutin ajan, jonka jälkeen paloteho laskee lineaarisesti kolmasosaan palotehon arvosta, josta sprinkleri aktivoitui. Systemi ei aina lopullisesti sammuta paloa, minkä vuoksi paloteho sen jälkeen pidetään vakiona. Jos maksimipaloteho on yli 5 MW sprinklerin aktivoituessa, palotehon kasvu jatkuu vakiona sprinklerin aktivoitumishetkestä alkaen. (BFS2013, s. 9.)

Taulukko 5. Sprinklauksen huomioon ottamisen vaihtoehdot.

Menetelmä	Lähde
Keskeytyy, kaksinkertaistuu ja vakio	Hietaniemi 2007
Keskeytyy ja alenee eksponentiaalisesti kaavan mukaisesti	Madrzykowski ja Vettori 1992 Evans 1992 Yu 1992 Hamins & McGrattan 1999
Alle 5 MW: Keskeytyy 1 minuutin kuluttua sprinklerin laukeamishetkestä Yli 5 MW: Keskeytyy ja vakio	Nydstedt 2011 (INSTA TS 950)
FDS	

Sprinklerin maksimikoon määrittämiseen vaikuttaa sammutettavan alan koko. Aktivoituminen riippuu palonkehittymisestä, sprinklerin herkkyydestä ja paikasta. Kun savupilvi kasvaa tulipalossa se sekoittuu ympäröivään ilmaan ja jäähtyy. Mitä pidempi matka palosta sprinkleriin, sitä matalampi lämpötila on saavuttaessaan sprinklerin. Viileämmät savukaasut johtavat pidempään aktivoitumisaikaan. Sprinklereiden herkkyyks on riippuvainen RTI (Response Time Index) -arvosta ja aktivointilämpötilasta. RTI-arvo riippuu tuotevalmistajasta ja se on normaalisti vähemmän kuin $50 \text{ m/s}^{0.5}$ ja aktivointilämpötila on alle 68 °C . (Nystedt 2010, s. 126.) Sprinklereille on asetettu kolme herkkyyksluokkaa, jotka ovat standardi 'A', erikois ja nopeatoiminen (SFS-EN 12845 s. 101).

Kuva 4. Sprinklauksen vaikutus palotehoon ajan funktiona.



Kuvassa 4 on esitetty sprinklauksen vaikutus palotehoon ajan funktiona. Paloteho on esimerkin tapauksessa kehittynyt 964 s aikana 3 MW:in, jolloin sprinkleri on lauennut. Tarkasteluaika rajoittuu 1800 sekuntiin. Taulukon 5 menetelmät on esitetty kuvassa 4 seuraavasti: Madrzykowski & Vettori 1992 (Q1), Evans 1992 (Q2), Yu ym. 1994 (Q3),

Hamins & McGrattan 1999 (Q4), yksinkertaistettu BFS2013 (Q5) ja Hietaniemi 2007 (Q6). Vesivuon mitoitustiheys on määritetty OH-luokan sprinklerille.

Sprinklereiden toiminnan mallintaminen on mahdollista myös FDS-palosimulointiohjelmaa käyttäen. Tässä vaihtoehdossa paloa ei määritellä ennalta kuvatus palotehon keinoin. Muun kuin alkupalon palaminen mallinnetaan termoplastista aineen palamismallia käyttäen, jolloin hyödynnetään aineen lämpötekniisiä ominaisuuksia, höyrystymislämpöä, syttymislämpötilaa ja syttymisen kriittistä massavuota. Palamisen voimakkuutta rajataan tässä tapauksessa yleensä maksimimassavuon parametrilla. (Hietaniemi 2007, s. 135.) Lisäksi sprinklerin vaikutus voidaan huomioida FDS:ssa myös ottamalla huomioon pelkästään kaasua jähdyttävä vaikutus tai terästä jähdyttävä vaikutus, sekä näiden kombinaatio. Tällöin palotehoa ei muokata FDS-ohjelmistossa.

Sprinklerijärjestelmien palotarkastuksissa on käynyt ilmi laitteistojen todennäköisimmän vian olevan niiden toimimattomuus yhden tai kahden suuttimen osalta. Koko järjestelmä ei tällöin toimi ja vikaantumistarkastelu toteutetaan tutkimalla tilannetta kahden suuttimen suojausalan suuruisella alueella, missä sprinklerijärjestelmä ei suojaa kohdetta. On mahdollista, että koko sprinklerijärjestelmä on menettänyt toimintakykynsä, mutta se on varsin epätodennäköistä. On kuitenkin pidettävä mielessä, että täysin luotettavia sprinklerijärjestelmäkään eivät ole. (Hietaniemi 2007, s.135-136.)

PRONTO-tietokanta pelastuslaitoksen ylläpitämä resurssi- ja onnettomuustilasto, mihin on vuoden 1996 jälkeen tilastoitu kaikki pelastuslaitokselle ilmoitetut onnettomuudet. Sitä käytetään pelastustoimen seurantaan ja kehittämiseen sekä onnettomuuden selvittämistä varten. PRONTO-aineistoon perustuvan systeemipohjaisen tutkimuksen luotettavuusarvio oli 98,1 %. Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa, jossa vikapuuhun on koottu sprinklerilaitteistoissa tyypillisesti esiintyviä komponentteja, saatiin luotettavuusarvioksi 99,4 %. Teräsrakenteisen ostoskeskuksen sprinklerilaitteistojen luotettavuusarvio, jossa vikapuut perustuivat kohteiden laitteistojen kytkentäkaavioihin, oli tutkimuksessa 98,7 %. Sprinklerin luotettavuuden voi ottaa huomioon suunnittelussa pienempänä mitoituspalo kuormana riskianalyysin avulla. Suuri luotettavuustaso mahdollistaa mitoituspalo kuorman pienentämisen, minkä edulliset vaikutukset näkyvät teräsrakenteiden palosuojaustarpeissa ja rakentamisen kustannuksissa. Samaisessa

ostoskeskuksen tapaustutkimuksessa osoitettiin, että sprinklereiden luotettavuutta voidaan arvioida ja perusteltu luotettavuusarvio toiminnallisen mitoituksen kanssa mahdollistaa innovatiiviset rakenneratkaisut ja merkittävät säästöt rakennuskustannuksiin. (Nieminen M. 2018, s.69-74, Salminen M.ym., 2019.)

3.9 Hyväksymiskriteerit

Hyväksymiskriteerit määritetään tapauskohtaisesti. Kriteerit koskevat rakennuksen käyttäjien turvallisuutta, pelastushenkilöstön turvallisuutta ja toimintaedellytyksiä, palon ympäristövaikutusten rajoittamista sekä rakenteiden palonkestävyydelle ja muille paloteknisille ominaisuuksille asetettuja vaatimuksia. (Lehtimäki ym. 1997, s. 16.)

Ympäristöministeriön asetus oletettuun palonkehitykseen perustuvassa kantavien rakenteiden mitoituksessa antaa rakennuksen ominaisuuksien mukaan vaatimukset, ettei rakennus sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana tai se ei sorru poistumisen turvaamiseen pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana. (Srmk 2017, asetus §13.)

Lämpötila vaikuttaa teräsrakenteeseen palotilanteessa, mutta alle 400 °C:een lämpötilassa lujuusominaisuudet eivät heikkene, mutta kimmokerroin alkaa laskea jo yli 100 asteessa vaikuttaen mahdollisesti stabiliteettiin, minkä lisäksi myös suhteellisuusraja muuttuu lämpötilan noustessa (SFS-EN 1993-1-2, s.22). Teräsrakenteiden lämpötilakehitystä voidaan verrata rakennesuunnittelijan laskemiin rakenteiden ja niiden osien kriittisen lämpötilan arvoihin, jos rakenteet ovat sellaisia, että välilliset kuormitukset ja epäsuorat vaikutukset voidaan osoittaa merkitykseltään vähäisiksi. Yleisessä tapauksessa näin ei ole, vaan kriittisten lämpötilojen määrittämiseen tähtäävän tarkastelun tulee ottaa myös esimerkiksi estetystä lämpölaajenemisesta aiheutuvat lisäkuormat tai palon aiheuttamasta paikallisesta lujuudenalennemasta johtuva kuormien uudelleenjakautuminen huomioon. Tarkastelu on tarpeen tehdä myös tilanteissa, joissa palo on erityisen voimakas tai laaja, mutta paikallisen palon vaikutukset tulee ottaa huomioon. Rakennesuunnittelijan tulee tarkastaa jatkuvan sortuman mahdollisuus.

4 TOIMINNALLINEN PALOMITOITUS RAKENNUSHANKKEESSA

4.1 Työnjako

4.1.1 Rakennushankkeen vaiheet

Rakennushankkeen tavoitteena on täyttää julkisyhteisön, yrityksen tai yksityisen ihmisen tilan tarve ja se käynnistyy päätöksestä rakentaa uutta tilaa tai korjata vanhaa. Talonrakennushanke jaetaan yleensä 1-8 vaiheeseen hankkeen hallinnan ja ohjaamisen helpottamisen kannalta. Tarveselvitys on hankkeen ensimmäinen vaihe. Siinä selvitetään käyttäjien ja omistajan strategia uuden tilan suhteen. Tavoitteena on analysoida paras mahdollinen ratkaisu tilantarpeeseen ottaen huomioon myös vaihtoehtoiset toimintastrategiat, kuten esimerkiksi tuotannon tehostamisen. Tarveselvityksessä kuvataan tarvittavat tilat ja niille asetetut vaatimukset, vaihtoehdot tilantarpeen tyydyttämiselle ja taloudelliset tavoitteet. Tuloksena saadaan päätös rakennushankkeeseen ryhtymisestä. Hankepäätöksen myötä rakennushankkeelle on määritetty alustava tilaohjelma, kuvaukset vaadituista tiloista ja hankkeen aikataulu. (Junnonen ym. 2017, s. 10, 18.)

Hankesuunnitteluvaiheessa selvitetään yksityiskohtaisemmin tarveselvitysvaiheessa määritettyjä tietoja, jolloin asetetaan hankkeelle täsmälliset tavoitteet toimivuuden, laadun, kustannusten, ajoituksen ja ylläpidon osalta. Hankesuunnitelma koostuu projektiohjelmasta, joka määrittää hankkeen läpiviennin tavoitteet sekä hankeohjelmasta suunnittelun tavoitteiden määrittämiseksi. Hankeohjelman perusteella suunnittelijat pystyvät laatimaan tavoitteiden mukaiset rakennussuunnitelmat. Tässä vaiheessa määritetään lisäksi hankkeen toteutustapa sekä rakennuspaikka ja aloitetaan lupamenettelyt paikan osalta. Vaiheeseen osallistuvat rakennushankkeeseen ryhtyvä, rakennuttajakonsultti, käyttäjä ja suunnittelijat. Hankesuunnitelman hyväksymisestä seuraa investointipäätös, johon dokumentoidaan tilaohjelma ja tilojen ominaisuuksia koskevat vaatimukset, selvitys rakennuspaikasta, hankkeen budjetti ja rahoitussuunnitelma sekä suunnittelu- ja rakentamisaikataulu. Tilaohjelman ja tiloille asetettavat vaatimukset määrittää arkkitehti, joka toimii yleensä rakennussuunnitteluvaiheessa pääsuunnittelijana. Tarvittaessa tässä vaiheessa

suunnittelussa ovat mukana myös rakennesuunnittelija, LVIS-suunnittelijat, kustannussuunnittelija, kiinteistöhoitoalan asiantuntija sekä muut suunnittelijat. (Junnonen ym. 2017, s. 24-25, 27.)

Rakennussuunnittelussa toimitaan tilaajan antamien tavoitteiden ja ehtojen mukaisesti kehittämällä ratkaisuja arkkitehtisesta, toiminnallisesta ja teknisestä näkökulmasta rakennuspaikkaan ja sen ympäristöön soveltuen (Junnonen ym. 2017, s. 52). Suunnittelijoiden tavoitteena on löytää kyseiseen rakennushankkeeseen määriteltyjen suunnittelutavoitteiden ja -ohjeiden perusteella parhaat suunnitteluratkaisut tilojen käyttäjien tarpeisiin sekä mahdollisiin toiminnan muutoksiin. Kustannusvaikutukset määrittyvät suunnitteluratkaisuissa ja tässä vaiheessa voidaan vielä vaikuttaa hankkeen talouteen merkittävästi. Rakennushankkeessa suunnittelijaryhmään kuuluu eri alojen suunnitteluasiantuntemusta. Ryhmän toiminnan kannalta on oleellista yhteistoiminta ja suunnitteluprosessin eteneminen aikataulun mukaan. Juha-Matti Junnonen ja Jouko Kankainen ovat kuvanneet hyvin suunnitteluryhmän toiminnan vaatimuksia kirjassaan *Rakennuttaminen*: ” Suunnittelussa tarvittavan tiedon on kuljettava oikea-aikaisesti ja virheettömästi, ja suunnitteluprosessin pitää lomittua suunnitelmallisesti ja häiriöttömästi päätöksentekoon, viranomaismenettelyihin, rakennuksen toteutukseen ja muihin hankeprosesseihin. ” (Junnonen ym. 2017, s. 43.)

Rakennussuunnittelu jaetaan kolmeen vaiheeseen ehdotus-, yleis- ja toteutussuunnitteluun. Ehdotussuunnitteluvaiheessa tavoitteena on tuottaa hankkeen tavoitteiden mukainen yleisratkaisu, jotka tehdään toimivuuden, ympäristöön soveltuvuuden ja kustannusten arvioimisen kannalta riittävän tarkoin. Rakennuspaikan kaavatilanne selvitetään tässä vaiheessa. Mikäli kyseessä on korjausrakentamiskohde, mm. mittauspiirustukset, rakenneanalyysi, haitallisten aineiden kartoitus, teknisen kunnan arviointi ja muut inventoinnit hankitaan olemassa olevasta rakennuksesta. Vaiheen päätyttyä valitaan ehdotussuunnitelma seuraavaan vaiheeseen. Ehdotussuunnitelma sisältää yleisratkaisut rakennuksen toiminnallisuudesta, arkkitehtuurista, ympäristöön liittymisestä ja kaupunkikuvallisuudesta sekä teknisistä ratkaisuista. Lisäksi kustannusarvio, kohteen sijainti tontilla, perustamisolosuhteet, alueen kunnallistekniset valmiudet ja liittymätiedot kuuluvat suunnitelmaan. (Junnonen ym. 2017, s. 52-53.)

Yleissuunnitteluvaiheessa ehdotussuunnitelmat jalostetaan toteutettaviksi yleissuunnitelmiksi. Hanke jaetaan muuntuviin ja kiinteisiin tiloihin, jotka voivat muuttua perusrakennuksen tilanjakoa toteutussuunnitteluvaiheessa. Yleissuunnitteluvaiheessa tarkoituksena on suunnitella tilaratkaisut, määritellä rakennuksen kiinteät ja muuttuvat osat, suunnitella talo-osia koskevat ratkaisut, suunnitella tilaosat ja aluesuunnittelun toimia. Yleissuunnitelmat ovat pohja rakennuslupa-asiakirjoille, sillä täsmentämällä ehdotussuunnitelmia rakenteita ja järjestelmiä rakenteellisen kokonaisuuden toteutumisen kannalta sekä rakennuskustannusten ja käyttö- ja huoltoasioiden osalta voidaan ne määrittää päätöksenteon pohjaksi. Rakennuslupahakemukseen liitettäviä dokumentteja ovat pääpiirustukset, selvitys rakennuspaikan perustamis- ja pohjaolosuhteista sekä viranomaisten vaatimat muut selvitykset, lausunnot ja laskelmat. Yleissuunnitelmien hyväksymisen jälkeen voidaan siirtyä toteutussuunnitteluvaiheeseen. (Junnonen ym. 2017, s. 53-54.)

Toteutussuunnittelu kehittää yleissuunnitelmia rakentamiseen ja hankintaa soveltuviksi. Toteutussuunnittelun jälkeen tiedossa ovat kohteen määrät, työtavat ja laatutaso toteutuskustannusten mukaisella tarkkuudella. Tässä vaiheessa tulee selvittää hankkeelle asetetut tavoitteet toiminnan ja käytön yksityiskohtaisten tarpeiden osalta. Lisäksi täytyy varmistaa käytettävien ratkaisujen ja detaljien tavoitteiden täyttyminen ja tarkastaa kaikkien osasuunnitelmien yhtenäisyys. Suunnittelu jatkuu vielä rakennusvaiheessa, jolloin hankkeen toteuttamiseen voidaan tarvita piirustuksia ja selostuksia. Valmistus- sovitus- ja täydentävät osapiirustukset kuuluvat rakentamisen aikaiseen suunnitteluun. Tämä nousee esiin erityisesti korjausrakentamisessa, jossa työn edetessä voi tulla esiin hankkeen etenemiseen ja kustannuksiin vaikuttavia seikkoja. (Junnonen 2017, s. 54-55.)

4.1.2 Rakennushankkeen osapuolet

Maankäyttö- ja rakennuslaissa 132/1999 rakennushankkeeseen ryhtyvä on viranomaisen näkökulmasta henkilö, jonka nimissä rakennusluvat haetaan. Samasta henkilöstä käytetään usein nimitystä rakennuttaja tai tilaaja. Rakennushankkeen käynnistäminen, lupien hankinta, rakentamisen läpivienti lakien ja asetusten mukaisella tavalla ja hankkeen vaatimusten ja tavoitteiden asettaminen kuuluvat rakennuttamisen tehtäviin.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on Maankäyttö- ja rakennuslain mukaisesti huolehdittava rakennuksen suunnittelu ja rakentaminen rakentamista koskevien säännösten ja määräysten sekä myönnetyn rakennusluvan mukaisesti. Rakennuttamisen organisointi ja rakentamisen tehtävien toimeenpanevista vastuuelimistä vastaaminen. Rakennushankkeeseen ryhtyvä huolehtii myös suunnittelijoiden, työnjohtajien sekä muiden tahojen vaatimusten mukaisesta kelpoisuusvaatimuksen täyttymisestä. Rakennuttaja vastaa lisäksi hankkeen kustannus- ja rahoitussuunnitelman sekä aikataulun laatimisesta. (RT 10-11222 s. 1-2.)

Rakennushankkeeseen tulee nimetä pääsuunnittelija, jonka vastuulla on suunnittelun kokonaisuus ja laatu. Nimetty henkilö vastaa suunnitteluryhmän työn koordinoinnista. Pääsuunnittelija täyttää rakennus- tai erityissuunnittelijan kelpoisuusvaatimukset ja omaa asiantuntemuksen ja ammattitaidon johtaa suunnitelmien yhteensovittamista. Lisäksi rakennushankkeessa on rakennussuunnittelija, käytännössä arkkitehti, jonka tehtävänä on kehittää arkkitehtoninen ratkaisu toiminnallisesta, teknisestä, taiteellisesta ja taloudellisesta näkökulmasta tavoitteet täyttyvä ratkaisu. Suunnitelmissa hän ottaa huomioon toiminnan vaatimat turvallisuus-, terveellisyys- ja ympäristönäkökohdat. (RT 10-11222 s. 3-4.)

Rakennesuunnittelijan vastuulla on kohteen rakennustekniset suunnittelutehtävät, joihin kuuluvat mm. runko- ja rakenneratkaisujen kehittäminen, rakenteiden mitoitus, rakennuksen toteutettavuudesta ja rakennusteknisestä ja rakennusfysikaalisesta toimivuudesta vastaaminen. Rakennushankkeen suunnittelijoihin kuuluvat myös erityissuunnittelijat ja talotekniikan suunnittelijat. Suunnittelijoiden lisäksi rakennushankkeessa voi olla suunnitteluun kuuluvien eri osa-alueiden asiantuntijoita, kuten palotekniset asiantuntijat tai esimerkiksi sisäilma-asiantuntija. Heidät voidaan liittää hankkeeseen erikseen tai osana rakennus-, rakenne tai taloteknisen suunnittelun toimeksiantoja. (RT 10-11222 s. 4.)

Rakennushankkeeseen liittyvät vielä myöhemmässä vaiheessa urakoitsijat, jotka rakennuttajan toimeksiannosta vastaavat rakennuksen rakentamisesta yhdessä rakennustyömaan johtajan kanssa. Lisäksi rakennuksen käyttäjät, jotka eivät varsinaisesti osallistu rakennushankkeeseen, muutoin kuin kertomalla käyttäjien

tarpeista rakennuttamisen organisaatiolle. Käyttäjiä ovat esimerkiksi erilaiset asukas-, henkilöstö- ja asiakasryhmät. (RT 10-11222 s. 3-4.)

4.1.3 Paloturvallisuussuunnittelun prosessi

Paloturvallisuussuunnittelu tulisi aloittaa tarpeeksi aikaisessa vaiheessa jo ennen maankäyttö- ja rakennuslain edellyttämää hankkeen aloituskokousta, jossa määritellään hyväksymiskriteerit ja periaatteet, joilla paloturvallisuussuunnitelmat voidaan hyväksyä. Neuvottelut ennen aloituskokousta järjestetään omistajan, käyttäjän, viranomaisten ja muiden rakennuksen turvallisuudesta vastaavien tahojen kanssa. Tarkoituksena on esitellä hanke eri osapuolille ja valmistella olennaiset paloturvallisuusvaatimukset rakennukselle. (RIL 221-2003, s. 24-25.)

Turvallisuusasiat otetaan huomioon rakennuksen koko elinkaarelle arvioitujen riskien mukaisesti. Rakennushankkeet ovat yksilöllisiä ja sen turvallisuussuunnitelmat perustuvat tehtyyn riskianalyysiin. Hankkeen tarveselvitys- ja tutkimusvaiheen tilojen käyttötarpeiden ja tilavaatimusten selvityksen jälkeen määritellään turvallisuustavoitteet. Niiden toteuttamista sitovat päätökset hyväksytään muiden suunnitteluperusteiden päätösten yhteydessä. Rakennuksen käyttäjien, turvallisuudesta vastaavien viranomaisten ja muiden osapuolten tavoitteet on tärkeää tuoda ilmi tässä vaiheessa. Konkreettinen vaikuttaminen turvallisuusasioihin aloitetaan hankesuunnitteluvaiheessa, jolloin suunnittelu käynnistyy. Mahdollisuudet vaikuttaa eri vaihtoehtojen toteutukseen ovat nyt parhaimmillaan, sillä hankkeen edetessä se on huomattavasti vaikeampaa, kun koko rakennuksen suunnitteluprosessi etenee. (RIL 221-2003, s. 26.)

Ehdotussuunnittelussa tehdään alustava arvio paloriskeistä sekä selvitetään palokuorman määrä, laatu ja sijoittaminen. Syttymislähteet voidaan luetteloida ja syttymisen todennäköisyydet arvioida sekä analysoida mitoittavat palotapahtumat. Tarveselvitysvaiheessa määritetyt tilojen käyttötarkoitukset asettavat turvallisuusvaatimuksia henkilömäärän ja henkilöiden poistumisen kannalta, jotka tulee kartoittaa. Lisäksi tehdään alustava suunnitelma savunpoisto- ja paloilmoitinjärjestelmästä sekä sammutuslaitteistosta. (RIL 221-2003, s.26.)

Investointipäätöksen jälkeen rakennushankkeeseen liitetään normaali projektihenkilöstö ja turvallisuusasiantuntijat. Yhdessä he laativat ja ryhtyvät toimiin mm. paloturvallisuudelle projektin ajalle asetettujen tavoitteiden täyttämiseksi. Turvallisuusasiantuntijoiden rooli on varmistaa valmiin rakennuksen rakentaminen turvallisuuden osalta suunnitelmien mukaiseksi. Paloturvallisuussuunnittelussa tutkittavat asiat ja palotekniset ratkaisut valmistellaan johdonmukaisesti projektiryhmää ja viranomaiskäsittelyä varten. Asteittainen ja järjestelmällinen suunnitteluprosessi helpottavat päätöksentekoa ja suunnitelmien hyväksymistä, sekä helpottaa neuvotteluja viranomaisten ja muiden hankkeeseen osallistuvien turvallisuusosapuolten kanssa. (RIL 221-2003, s.26.) Rakentamisen aikaiset paloturvallisuusasiat eivät kuulu tämän työn sisältöön.

Taulukko 6. Taulukko luotu yhdistämällä lähteitä RT 10-11256 ja RIL 221-2003.

Toiminnallinen palomitoitus rakennushankkeen eri vaiheissa		
Rakennushankkeen vaihe	Toiminnallisen palomitoituksen prosessi	Rakennushankkeen osavaiheen hyväksyminen
Tarveselvitys	-Määriteltyjen tilojen käyttötarkoitukset asettavat turvallisuusvaatimuksia.	Hankepäättös
Hankesuunnittelu	-Turvallisuustasoon vaikuttavat asiat otettava huomioon suunnittelun käynnistämisestä lähtien -Päättös suunnittelusta PO-luokkaan -Investointipäätöksen jälkeen normaalin projektihenkilöstön lisäksi turvallisuusasiantuntijat.	Suunnittelun valmistelu Investointipäättös Suunnittelupäättös
Ehdotussuunnittelu	OSA 1: ESITIEPAPERI -Hankkeeseen ja sen riskeihin tutustuminen, sekä kulttuuri- ja muiden arvojen määrittäminen. -Hankkeeseen liittyvät eri intressitahot: informointi ja turvallisuustavoitteiden kartoitus. - Lähtöarvojen määrittäminen. - Alustava ehdotus turvallisuusratkaisuista. - Aloitusneuvottelu. - Esitetietojen hyväksyttäminen. - Päättös suunnittelusta PO-luokkaan	Valitaan ehdotussuunnitelma
Yleissuunnittelu	OSA2: SUUNNITELMAT Paloturvallisuusanalyysi -Laskenta ja raportointi -Tulosten vertaaminen hyväksymiskriteereihin -Mahdolliset lisäselvitykset -Suunnitelman hyväksyttäminen -Suunnitelmien ajantasaisuus -3. osapuolen tarkastelu	Hyväksytään yleissuunnitelmat ja pääpiirustukset Rakennuslupatehtävät
Toteutussuunnittelu	-Lisälaskenta esim. tilanmuutosten seurauksena - 3. osapuolen tarkastelu tarvittaessa - Huoltokirja - Rajoitusmerkinnät PO	Hyväksytyt toteutussuunnitelmat. Rakentamispäättös. Aloituskokous ennen rakentamisen aloittamista. Rakentamisen valmistelu
Rakentaminen		Vastaanottopäättös
Käyttöönotto		Takuuaika
Käyttö	Muutosten aiheuttamat tarkastelut	

4.1.4 Viranomaisyhteistyö

Pelastusviranomaiset valtion tasolla ovat sisäministeriön ylijohtaja ja hänen määräämänsä sisäministeriön ja aluehallintoviraston virkamiehet. Alueellisia pelastustoimen pelastusviranomaisia ovat pelastuslaitoksen ylin viranhaltija ja hänen määräämänsä pelastuslaitoksen viranhaltijat sekä alueen pelastustoimen asianomainen monijäseninen toimielin. (Pelastuslaki 29.4.2011/379, §25.) Pelastustoimen palvelutasosta ja pelastuslaitoksen toiminnan asianmukaisesta järjestämisestä ja muista pelastuslaissa säädetyistä tehtävistä vastaa alueen pelastustoimi.

Pelastuslaitoksen tehtäviin kuuluvat alueellinen ohjaaminen, neuvonta ja turvallisuusviestintä. Tavoitteena on ehkäistä ja varautua tulipaloihin ja muihin onnettomuuksiin. Lisäksi asianmukainen toiminta onnettomuus- ja vaaratilanteissa, sekä seurausten rajoittaminen kuuluvat pelastuslaitoksen tavoitteisiin. Pelastuslaitos huolehtii omalla alueellaan pelastustoimen valvontatehtävistä. Heidän tulee huolehtia myös väestön varoittamisesta vaara- ja onnettomuustilanteissa, sekä siihen tarvittavasta hälytysjärjestelmästä. Pelastustoimintaan kuuluvat tehtävät hoitaa alueellinen pelastuslaitos. (Pelastuslaki 28.12.2018/1353, §26.) Pelastusviranomaisen tehtävänä on puolestaan ohjata, neuvoa ja valvoa ihmisten turvallisuutta ja onnettomuuksien vähentämistä. Lisäksi uhkaavassa tai tapahtuneessa onnettomuudessa pelastaa ihmiset, turvata tärkeät toiminnot ja rajoittaa onnettomuuksien seurauksia mahdollisimman tehokkaasti ihmisten, omaisuuden ja ympäristön osalta. (Pelastuslaki 28.12.2018/1353, §1, 2.)

Palotarkastukset ja muut valvontatehtäviä edellyttävät toimenpiteet suorittaa alueen pelastusviranomainen. Mikäli pelastusviranomainen tarvitsee kohteen pelastussuunnitelmaa tai palo- ja poistumisturvallisuudesta laadittuja asiakirjoja, on kiinteistön omistajan, haltijan tai toiminnanharjoittajan toimitettava ne alueen pelastusviranomaiselle. Pelastusviranomainen voi valvontatehtävässä havaittujen puutteiden perusteella määrätä ne korjattavaksi määräaikaan mennessä. Jos havaitut puutteet tai virheellinen menettely voi aiheuttaa välittömän tulipalon tai muun onnettomuuden vaaran, pelastusviranomainen voi keskeyttää toiminnan ja määrätä välttämättömät toimenpiteet tehtäväksi onnettomuuden ehkäisemiseksi. Tällöin on ilmoitettava myös asianomaiselle valvontaviranomaiselle. (Pelastuslaki 29.4.2011/379,

§81.) Erityisten turvallisuusvaatimusten mukaisesti pelastusviranomainen voi ryhtyä välttämättömiin toimenpiteisiin turvallisuuden parantamiseksi. Rakennuslupaa tai toimenpidelupaa varten edellytetään kunnan rakennusvalvontaviranomaisen kuuleminen. (Pelastuslaki 29.4.2011/379, §82.) Rakennuslupaan liittyvissä paloteknisissä kysymyksissä rakennusvalvontaviranomainen voi pyytää pelastusviranomaista toimimaan asiantuntijana, vaikka pelastusviranomaisella ei ole päätösvaltaa rakennuslupa-asioissa. (RIL 195-1-2018: s. 14.)

Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää rakennuksen rakentamiseen ja korjaus- tai muutostyöhön rakennuslupan. Se vaaditaan, jos kerrosalaan laskettavaa tilaa lisätään tai työllä on vaikutusta käyttäjien turvallisuuteen tai terveydellisiin oloihin. Lupa tarvitaan myös rakennuksen tai sen osan käyttötarkoituksen olennaista muutosta tehtäessä. (MRL 5.2.1999/132, §125.) Rakennuslupan myöntää rakennusvalvontaviranomainen ja hakemus tehdään kirjallisena (MRL 5.2.1999/132 §130). Hankkeen laatu ja laajuus huomioon ottaen rakennuslupahakemukseen voi maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää liitettäväksi asiakirjoja (MRL 17.1.2014/41, §131). Pääpiirustukset hyväksytään rakentamisessa noudatettaviksi rakennuslupan myöntämisen yhteydessä. (MRL 5.2.1999/132, §134.) Rakennusluvassa, aloituskokouksessa tai erityisestä syystä rakennusvalvontaviranomainen voi määrätä hankkeen laadusta ja laajuudesta riippuen tarpeellisia erityissuunnitelmia, jotka laaditaan ja toimitetaan rakennustyön aikana. Rakennushankkeeseen ryhtyvä vastaa näiden suunnitelmien toimittamisesta, ennen kuin suunnitelmaa koskevaan työvaiheeseen siirrytään. Tarkempia säännöksiä sisällöstä ja esitystavasta voidaan antaa Ympäristöministeriön asetuksessa. (MRL 17.1.2014/41, §134a.)

Maankäyttö- ja rakennuslaissa 18. pykälässä määritellään rakentamisen luvat ja toimenpiteet. Rakennusvalvonta kohdistaa huomionsa mm. rakennuksen tekniseen toimivuuteen, turvallisuuteen ja terveyteen, sekä rakennustyön suorittamiseen. Rakennusvalvontaviranomainen huolehtii kohteen rakentamisen noudattavan laissa tai sen nojalla asetettuja säädöksiä ja määräyksiä. Erityisesti huomiota kiinnitetään hankkeen toteuttamisesta vastaavan toimintaan heidän velvollisuuksien ja määräyksien noudattamisesta. Rakennusvalvonta tarkastaa suunnittelijoiden ja työnjohtajien kelpoisuudet työtehtäviin, tekevät suunnitelmien ennakkokatselmukset sekä suorittavat rakennuspaikalla pidetyt katselmukset ja tarkastukset. Hankkeen luonne ja

rakennuttajan oman valvonnan taso voi vaikuttaa viranomaisvalvonnan laajuuteen ja laatuun. Paloviranomaisilla on oma vastuualueensa valvonnessa. (RT 10-11222 s.5.)

Rakennusluvassa voidaan määrätä rakennustyön aloituskokouksesta. Rakennusvalvontaviranomainen harkitsee kohteen vaativuuden ja toteuttajien asiantuntemuksen ja ammattitaidon sekä muiden hyvän lopputuloksen kannalta vaikuttavien tekijöiden perusteella. Rakennushankkeeseen ryhtyvän tehtävänä on huolehtia aloituskokouksen pitämisestä ennen rakennustyön aloitusta. Aloituskokoukseen osallistuu rakennusvalvontaviranomaisen edustaja, rakennushankkeeseen ryhtyvä tai tämän edustaja, rakennuksen pääsuunnittelija ja vastaava työnjohtaja. Pöytäkirjaan merkataan rakennushankkeeseen ryhtyvää koskevat velvoitteet, suunnittelun ja rakennustyön keskeiset toimijat ja heidän tarkastustehtävänsä, viranomaiskatselmukset ja -tarkastukset sekä muut selvitykset ja toimenpiteet rakentamisen laadusta. Sovittuja menettelyitä on noudatettava rakennustyössä. (MRL 17.1.2014/41, §121.) Laissa säädetyn tai sen nojalla asetetun säännöksen, määräyksen, kiellon tai muun rajoituksen poikkeaminen on mahdollista maankäyttö- ja rakennuslain pykälien 171, 172 ja 175 tavoin (RIL 195-1-2018 s. 8-11).

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta on velvoittava sekä rakennustyöhön ryhtyvälle että viranomaiselle ja ainoastaan maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellyt tavat poiketa ovat hyväksyttäviä. Viranomaisten ei tulisi asettaa tiukempia vaatimuksia kuin mitä asetus edellyttää, sillä hyväksyttävään turvallisuustasoon pääsee suunnittelemalla ja rakentamalla asetuksen mukaisesti. Rakennustyöhönryhtyvän on kuitenkin varmistettava asetuksessa osoitettujen vaatimusten täyttyminen. (RIL 195-1-2018, s. 10.)

4.1.5 Kolmannen osapuolen tarkastelu

Maankäyttö- ja rakennuslaki antaa mahdollisuuden rakennusvalvontaviranomaiselle vaatia kolmannen osapuolen tarkastelua. Lupahakemusta käsitellessä rakennusvalvontaviranomainen voi vaatia rakennushankkeeseen ryhtyvältä riippumattoman ja pätevän asiantuntijan lausunnon, jonka tarkoituksena on tarkastella suunnitteluratkaisujen ja rakentamisen täyttäneen sille säädetty vaatimukset. Lausuntoa voidaan vaatia Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan mikäli ”rakentamisessa käytetään

sellaisia rakennuksen turvallisuuteen, terveellisuuteen tai pitkäaikaiskestävyyteen merkittävästi vaikuttavia suunnittelu- ja toteutusmenetelmiä tai tuotteita, joiden toimivuudesta ei ole yleisesti varmuutta tai aikaisempaa kokemusta.” (MRL 17.1.2014/41, §150c.) Toiminnallista palomitoitusta käytetään kohdekohtaisesti, joten ratkaisut poikkeavat yleisistä ratkaisuista, sen vuoksi P0 -luokan rakennus vaatii 3. osapuolen tarkastuksen. Ulkopuolinen tarkastus on tällöin rakennusvalvontaviranomaiselle keino varmistaa ja parantaa rakennettavan kohteen laatutasoa suunnitteluratkaisujen pohjalta.

Menettelyn tavoitteet täyttyvät varmistamalla rakennushankkeeseen ryhtyvän ja suunnittelijoiden tunnistaneen hankkeen olennaisimmat riskit ja ryhtyneen toimiin niiden ehkäisemiseksi. Tämä toteutetaan yleisimmin suunnitelmien ulkopuolisella tarkastelulla hakemalla lausunto riippumattomalta ja pätevältä asiantuntijalta. Lausunto antaa vastauksen, onko suunnittelussa käytettävät ratkaisut niille säädettyjen vaatimusten mukaiset. Ulkopuolisen tarkastajan olisi toivottavaa olla mukana jo hankkeen alussa, jolloin hän voisi tarkastaa mm. suunnittelun lähtötietoja. Tarkastusprosessia viedään eteenpäin vuorovaikutteisesti rinnakkain varsinaisen suunnittelun kanssa. (RT 10-11222 s.4.) Menettelyn laajuuden ja kohdistuksen määrää rakennusvalvontaviranomainen, joka voi määrätä rakennusluvassa, aloituskokouksessa tai erityisen syyn vuoksi rakennustyön aikana erityismenettelystä. Erityismenettelyn kohteena olevat rakenteet tai rakennuksen ominaisuudet voidaan määrätä seurattavaksi myös rakennuksen käytön aikana maankäyttö- ja rakennuslain olennaisten teknisten vaatimusten mukaisesti. Standardissa SFS-EN 1990 laajan valvonnan tasoon kuuluva luotettavuusluokka RC3 ja sitä vastaava valvontataso DSL3 edellyttää kolmannen osapuolen tarkastusta laskelmien, piirustusten ja eritelmien tarkastamista. Luokkaan kuuluvat CC3-seuraamusluokan rakennukset, johon kuuluvat hengenmenetyksen, hyvin suurien taloudellisten ja sosiaalisten tai ympäristövahinkojen tapaukset. (SFS-EN 1990, s. 138.)

4.2 Ohjeet raportointiin

Rakennuslupa-asiakirjoihin liitetään oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun selvitykset. Asiakirjaliitteet sisältävät lähtötiedot rakennuksesta sekä tehdyt olettamukset perusteluineen. Lisäksi suunnittelussa käytettävät menetelmät ja niiden

kuvaus, jossa esitetään laskenta- ja koemenetelmien soveltuvuus rajoituksineen, liitetään rakennuslupahakemukseen. Liitteisiin kuuluvat myös saadut tulokset herkkyyssanalyysineen, hyväksymiskriteerit ja tulosten vertailu niihin, sekä analyysien ja johtopäätösten esittäminen viranomaisille (TUT 2017, s. 15). Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää lisäksi paloturvallisuussuunnittelusta vastaavalta erityissuunnittelijalta, että erityissuunnitelmat täyttävät rakentamista koskevat säännökset ja määräykset ja hyvän rakennustavan vaatimukset. Erityissuunnittelija laatii myös erityissuunnitelmaan rakennustyön aikaisia muutoksia ja laatii rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeen oman erityisosaamisensa alalta. (MRL 17.1.2014/41 §120 c.)

4.2.1 OSA 1 Esitietopaperi

Esitietopaperin tarkoitus on laatia lyhyehkö selostus, mitä kohteessa tullaan tarkastelemaan ja miksi. Pelastusviranomaisen hyväksyttyä esitietolomakkeen suunnitelmat, voidaan aloittaa toiminnallinen tarkastelu. Tarkoituksena on parantaa suunnitteluprosessia ja välttyä turhalta työltä. Viranomaisten kanssa yhdessä käytyjen keskustelujen tuloksena voidaan varmistaa kohteessa selvitettävät olennaiset asiat paloturvallisuuden kannalta.

Esitietopaperissa esitellään tarkasteltava kohde. Lyhyessä johdannossa tulee käydä ilmi rakennuskohteen pääkäyttötarkoitus, kerroksisuus, paloluokka ja suojaustaso. Käyttötarkoitukseltaan poikkeavien tilojen esittely ja palonkestävyysvaatimus kuuluvat myös kohteen esittelyyn. Tarkasteltavat rakenteet ja tutkimuskohteet voidaan käydä läpi jo tässä vaiheessa esitietopaperia. Savunpoiston kannalta olennaiset asiat, kuten savunpoistotaso ja toimintavarmuusluokka, mutta myös savunpoistojärjestelyt ja korvausilman saanti käsitellään lyhyesti. Lisäksi paloilmajärjestelmä ja mahdollinen automaattinen sammutusjärjestelmä löytyvät esitietopaperista. Lyhyesti osoitetaan toiminnallisessa tarkastelussa käytettävät ohjelmistot ja niiden laskentatarkkuus. Esitietopaperiin liitetään mukaan myös pelastuslaitoksen toimintavalmiusaika.

Tarkasteltavat tapaukset esitellään suurimman palokuorman ja syttymistodennäköisyyden perusteella ja ne sijoitetaan tarkastelun kannalta kriittisiin paikkoihin. Tutkittavat tapaukset tuodaan esiin jokainen tarkasteltavan palotilanteen osalta kohta kohdalta. Palojen sijainnin selkeä esitys voidaan toteuttaa pohjapiirroksessa

kuvatuilla alueilla, mutta myös lyhyt kirjallinen kuvaus tilanteista on suotavaa. Esitiedoissa perustellaan palomallin käyttö ja se mitä sen käytännössä oletetaan edustavan. Jos palomalli sisältää lähteen mukaan joitain olettamuksia, ne on käytävä ilmi tässä dokumentissa. Herkkyystarkastelussa voidaan tarkastella esimerkiksi palotehon kasvattamisen seurauksia palonkestoajaksi. Lopuksi määritellään hyväksymiskriteerit, joilla toiminnallinen tarkastelu voidaan hyväksyä. Teräsrakenteiden lämpötilakehitystä voidaan verrata rakennesuunnittelijan laskelmiin rakenteiden kriittisestä lämpötilasta. Tarkastelu voidaan suorittaa lisäksi kehittyneillä laskentamenetelmillä, mikäli rakennesuunnittelija katsoo sen tarpeelliseksi. Tällöin rakenneanalyysi voidaan tehdä rakenneosan, rakenteen osien tai rakenteen kokonaistarkasteluna, millä tutkitaan sortumattomuutta ja rakenteiden riittävän pieniä siirtymiä. Liitteissä esitetään kohteen pohjapiirustukset ja leikkauskuvat. Lisäksi, jos tutkittaviin tapauksiin kuuluu poistumissimulointia tai palokaasujen leviämisen ja näkyvyyden tutkimusta, niistä laaditaan vastaavanlainen selostus. Esitietopaperissa maininta 3. osapuolen tarkastelusta on suotavaa.

4.2.2 OSA 2 Suunnitelmat

Toiminnallisen tarkastelun raportti pohjautuu esitietopaperiin ja se sisältää tulokset ja lausunnon tutkittavista tapauksista. Raportin aluksi johdanto kertoo esitietojen tapaan lyhyesti rakennuksesta, käytetyistä ohjelmistoista ja laskelmissa käytetyistä arvoista standardeihin viitaten. Raportissa esitellään yhdessä pelastusviranomaisen kanssa käydyn esitietopaperin hyväksytyt tutkittavat skenaariot ja hyväksymiskriteerit. Palosimuloinnin laskentatarkkuus ja huomioon otettavat asiat, kuten kohteen sprinklauksen huomioiminen simuloinnissa kuuluvat raportin sisältöön. Käytettävät palomallit, joita löytyy esimerkiksi VTT:n mitoituspaloerästä (Hietaniemi 2007) esitellään samaan tapaan kuin esitiedoissa. Palosimulointien tuloksena voidaan tarkastella rakenteen ja tarkasteltavan tila lämpötilakehitystä. Tulosten tarkastelussa voidaan hyödyntää kuvia laskentamallista ja kuvaajia lämpötilan kehityksestä tarkasteltavien tilanteiden havainnollistamiseksi. Myös mahdolliset näkyvyystarkastelu ja poistumissimuloinnin tulokset esitellään raportissa. Lausunto antaa perusteellisen vastauksen tarkastelun alla olleiden tapauksien tulosten mukaan.

4.2.3 Pelastussuunnitelmat

Rakennuksen omistaja ja haltija sekä toiminnanharjoittaja ovat velvollisia ennalta ehkäisemään tulipalojen ja muiden vaaratilanteiden syntymistä rakennuksissa. Jos vaaratilanteita syntyy, on kuitenkin varauduttava henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojaamiseen. Lisäksi tulipalojen omatoiminen sammuttaminen tai muut pelastustoimenpiteet on oltava mahdollista. Tehtäviin kuuluvat lisäksi poistumisen turvaaminen tulipaloissa tai muissa vaaratilanteissa sekä toimenpiteet pelastustoiminnan auttamiseksi. Pelastussuunnitelma laaditaan edellä esitettyjen toimenpiteiden pohjalta. Pelastussuunnitelma vaaditaan, jos kohde on poistumisturvallisuuden tai pelastustoiminnan kannalta tavanomaista vaativampi rakennus tai muu kohde. Se vaaditaan myös kohteissa, joissa henkilö- tai paloturvallisuudelle, ympäristölle tai kulttuuriomaisuudelle aiheutuvan vaaran tai mahdollisen onnettomuuden aiheuttamien vahinkojen arvioidaan olevan vakava. Pelastussuunnitelma sisältää vaarojen ja riskien arvioinnin, rakennuksen ja toiminnassa käytettävien tilojen turvallisuusjärjestelyt, asukkaille ja muille henkilöille annettavat ohjeet onnettomuuksien ehkäisemiseksi sekä onnettomuus- ja vaaratilanteissa toimimiseksi ja näiden lisäksi mahdolliset muut kohteen omatoimiseen varautumiseen liittyvät toimenpiteet. Rakennuksen tai kohteen haltija vastaa yhdessä toiminnanharjoittajien kanssa pelastussuunnitelman laatimisesta. Erityisesti hoitolaitoksen ja palvelu- ja tukiasumisen toiminnanharjoittajan kanssa pelastussuunnitelma tehdään aina yhteistyössä. (Pelastuslaki 5.2.1999/132, §14, 15.)

Rakennuksen käyttöä, huoltoa, kunnossapitoa ja paloturvallisuustarkastuksia koskevat paloturvallisuustekijät ja toimenpiteet esitellään pelastussuunnitelmassa. Siinä huomioidaan paloturvallisuusjärjestelyt, paloautomaattikalaitteet, käytettävissä olevat pelastusvoimat ja niiden saatavuus. Turvallisuustason säilyttämiseksi turvallisuusjärjestelyjen toimintaa täytyy seurata. Olosuhteiden ja toiminnan muuttuessa pelastussuunnitelmaa täytyy päivittää ja tarkastaa pelastussuunnitelmassa asetettujen vaatimusten täyttyminen. Rakennuksen omistaja ja haltija, teollisuus- tai liiketoiminnan harjoittaja, virasto, laitos tai muu vastaava yhteisö laatii pelastussuunnitelman. Suunnitelmasta käy ilmi vaaratilanteet ja niiden vaikutukset, toimenpiteet vaaratilanteiden ehkäisemiseksi ja suojautumismahdollisuudet, suojeluhenkilöstön, käytettävissä olevan suojelumateriaalin ja toimintasuunnitelman erilaisissa vaaratilanteissa. Suunnitelmaa käytetään yhteisön kaikkien turvallisuusasioiden

hoitamiseen. Se on yrityksen, laitoksen tai kiinteistön turvallisuusohjeisto, jossa kuvataan turvallisuusasioiden hoitoon liittyvät pääperiaatteet ja tavoitteet sekä eri henkilöiden vastuut. Paloturvallisuuden suunnitteluperusteet ja tehtävät rakennuksen käytölle, kunnossapidolle ja huollolle ovat dokumentoituna pelastussuunnitelmaan kuuluvassa asiakirjassa. (RIL 221-2003 s.29-30.)

4.2.4 Huolto- ja käyttöohje

Pysyvään asumiseen tai työskentelyyn käytettäviin rakennuksiin täytyy laatia käyttö- ja huolto-ohje. Ohje on laadittava myös, mikäli rakennuksen korjaus- ja muutostyön tai käyttötarkoituksen muutokseen tarvitaan rakennuslupaa. Ohjeen laadinnasta vastaa rakennushankkeeseen ryhtyvä. Maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 117i määritellään ohjeen sisältö seuraavasti: ”Käyttö- ja huolto-ohjeen tulee sisältää rakennuksen käyttötarkoitus ja rakennuksen ominaisuudet sekä rakennuksen ja sen rakennusosien ja laitteiden suunniteltu käyttöikä huomioon ottaen tarvittavat tiedot rakennuksen asianmukaista käyttöä ja kunnossapitovelvollisuudesta huolehtimista varten” (MRL 21.12.2012/958, §117 i.)

Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje luovutetaan kiinteistön omistajalle. Se koostuu hankkeen aikana eri tahojen ja osapuolten laatimista asiakirjoista. Toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvassa suunnittelussa käyttö- ja huolto-ohjeeseen lisätään pelastussuunnitelmassa edellytetyt toimenpiteet. Mikäli kohteessa tehdään muutoksia, vaikutus paloturvallisuuteen täytyy aina tarkastaa. Käyttö- ja huolto-ohjeesta löytyvät paloturvallisuuteen vaikuttavat olennaiset tekijät, joita voivat olla paloturvallisuuteen vaikuttavat rakenteet, laitteiden hoito, huolto ja kunnossapidontehtävät, keskeisen huoltokohteiden ja tilojen paikantamistiedot ja kunnossapitojaksot sekä -tehtävät. Lisäksi korjauspäiväkirjan ylläpito ja toimintaohjeet poikkeus- ja häiriötilanteissa esitetään kyseisessä ohjeessa. (RIL 221-2003.) Jos rakennus on rakennettu paloluokkaan P0, henkilö määrä ja palokuormaa koskevat tiedot on ilmoitettava rakennuslupapäätöksessä. Kiinteä merkintä on sijoitettava rakennukseen helposti havaittavaan paikkaan. (Srmk 2017, asetus §9.)

5 CASE OULUHALLIN LAAJENNUKSEN LIIKUNTASALIN TERÄSRISTIKOIDEN TOIMINNALLINEN TARKASTELU

5.1 Kohteen esittely

Ouluun osoitteeseen Ouluhallintie 20 rakennetaan olemassa olevaan Ouluhalli-nimiseen kokoontumistilaan 2-kerroksinen laajennus. Laajennus liittyy kiinteästi olemassa olevaan P3-paloluokan Ouluhalliin, jonka suojaustaso on 2 hätäkeskukseen liitetty paloilmotin. Uudessa laajennuksessa suojaustaso on 2+3 hätäkeskukseen liitetty paloilmotin ja automaattinen sammutuslaitteisto. Laajennukseen tulevan liikuntasalin pinta-ala on 1744 m². Tarkasteltavana on salin teräsristikoiden ylä- ja alapaarteiden lämpötilankehitys.

Taulukko 7. Tarkasteltavat rakenteet ja niiden dimensiot.

Materiaali	Yläpaarre	Alapaarre	Diagonaalit
S355J2H	RHS 250 x 150 x 12,5	RHS 250 x 150 x 8	150 x 100 x 8

5.2 Paloskenaariot ja mitoituspalot

Rakennuksissa paloskenaarioiden määrä on ääretön, mutta todennukaiset skenaarioita tutkitaan tarkastelemalla kohteen suurimpia palokuormia ja sijoittamalla ne syttymistodennäköisyyksien perusteella paikkoihin, joissa niiden seurauksena aiheutuvat teräsrakenteelle suurimmat lämpörasitukset. Tapaukset esitellään lyhyesti ja palotehon arviointiin käytetään luotettavaa tietolähdettä esimerkiksi VTT mitoituspalokokoelmaa (Hietaniemi 2007). Paloskenaarioissa voidaan huomioida sprinklauksen jäähdyttävä vaikutus. Kohteen paloskenaarioista keskustellaan alueen pelastusviranomaisen kanssa, mitä varten suunnittelija tekee esitietopaperin. Tulokset esitellään erillisessä raportissa ja lausunnossa.

Simulointien tavoite on arvioida kantavien teräsrakenteiden kestävyyttä palotilanteessa oletetuissa palotilanteissa. Hyväksyttävyyssuhteena käytetään teräsrakenteiden

lämpötilan kehitystä, jota verrataan rakennesuunnittelijan määrittämiin rakenteiden kriittisiin lämpötiloihin. Tämän yksinkertaistetun menetelmän lisäksi rakennesuunnittelija voi ottaa kantaa välillisten kuormien vaikutuksiin rakenteessa lämpölaajenemisen, rakenteen kokonaiskäyttäytymisen ja liitosten osalta. Toiminnallinen tarkastelu perustuu kohteen uhkakuviin ja analyysissä tutkitaan laskennallisesti teräsrakenteiden lämpötilojen kehitystä palotilanteessa oletettujen paloskenaarioiden muodossa. Herkkyystarkastelussa tutkitaan kasvatetun ja laajennetun palon vaikutusta tilan lämpötiloihin ja verrataan palon lämpörasituksia teräsrakenteiden kriittisiin lämpötiloihin. Tarkastelussa voi esimerkiksi kasvattaa alueen kokoa tai/ja palotehoa.

Liikuntasalissa palokuormaa ja syttymislähteitä on hyvin vähän, mutta siellä voidaan monitoimihallille tyypilliseen tapaan järjestää konsertteja, joissa tarvitaan esiintymislavaa. Sen malli sisältää 4 kpl vahvistimia tai muita sähköisiä laitteita, joista jokaisen paloteho on viisinkertainen verrattuna tavallisen television palotehoon eli maksimipaloteho on 1000 - 1500 kW jokaista laitetta kohden. Näiden lisäksi mallissa on 3 kappaletta vahvistimia tai muita sähköisiä laitteita, joiden paloteho on kymmenkertainen tavallisen television palotehoon eli noin 2000 – 3000 kW laitetta kohti. Lavan rakentamiseen on ajateltu käytettävän vaneria, jonka luovuttava paloteho on n. 100 – 120 kW/m². Sen lisäksi mahdolliset verhot akryylin kaltaisesta materiaalista on huomioitu mallissa. Lava on kooltaan 10 metriä leveä, 5 metriä syvä ja 4 metriä korkea. Esiintymislavalle ei ole tehty täyden mittakaavan polttokokeita, minkä vuoksi niiden voimakkuutta on jouduttu arvioimaan välillisesti. Oletuksena on, että palo alkaa yhdestä lähellä verhoa sijaitsevasta laitteesta, josta palo leviää muihin laitteisiin ja rakenteisiin. (Hietaniemi 2007, s.53.)

Toinen tarkasteltava tapaus on myyntikojujen leviämispalo. Myyntikojujen oletetaan leviävän yhdestä, tilassa järjestettävässä esittely- tai kirpputoritapahtuman kojusta lähellä oleviin kojuihin. VTT:n mitoituspaloelmasessa on esitetty myyntikojujen palokoetuloksiin palomalli, jota käytetään tässä työssä. Mitoituspaloelmasesta valitaan kokoelman suurimman palotehon 3,2 MW myyntikoku. Kytevä palon vaihe jätetään simuloinneissa pois laskenta-ajan säästämiseksi, koska lopputulosten kannalta sillä ei ole merkitystä, muuten kuin sammutusajan lyhentymisellä, joten siten päädytään laskennassa varmalle puolelle ajatellen todellista tilannetta.

Koju on kooltaan 1,2 metriä leveä, 1,2 metriä syvä ja 2,1 metriä korkea. Tarkasteltava messukoju on esitetty VTT mitoituspalokokoelman sivulla 53 ja sen tietolähteenä on (Paloposki T. 2015). Tarkastelussa tutkitaan neljän myyntikojun paloa, jotka sijoittuvat seinän viereen ja joista kolme on 1,2 metrin etäisyydellä toisistaan seinälinjassa. Neljäs koju sijoitetaan 1,2 metrin päähän kohtisuoraan keskimmäisestä kojusta. Palon leviäminen toiseen myyntikojuun katsotaan tapahtuvan, kun lämpövuoto saavuttaa arvon 10 kW/m^2 kojun pinnalla. 10 kW/m^2 on matalin lämpövuon arvo syttymiselle ohuilla materiaaleilla (Quintiere 2006, s. 166).

Katsomopalossa oletuksena on kevyesti pehmustettu muovituolikatsojamo, jonka rakenteet ovat tehty teräksestä. Istuinmateriaalin paloteho pinta-alaa kohden on 600 kW/m^2 ja herkkyytstarkastelussa 750 kW/m^2 . Tutkittavassa katsomopalossa katsomon ylin penkkirivi on 3 metrin korkeudella liikuntasalin kentän pinnasta. Tällöin etäisyys teräsristikon alapaarteeseen on 7 metriä. Yksi tuoli painaa 1,5 kg ja sen lämpöarvo on 40 MJ/kg. Istuimen mitat ovat kooltaan $0,42 \times 0,55 \text{ m}^2$.

Palon oletetaan leviävän alkusammutukseen saakka, jolloin se rajoittaa paloa ja palo jäähtyy. Oletuksena käytetään palon leviämistä 36 istuimen alueelle $15,2 \text{ m}^2$, jolloin maksimipaloteho on 3,1 MW. Herkkyytstarkastelussa on pienennetty palon leviämisen aluetta ja kasvatettu maksimipalotehoa pinta-alaa kohden arvoon 750 kW/m^2 , minkä oletetaan leviävän 18 istuimen pinta-alaltaan $7,4 \text{ m}^2$ alueelle. Maksimipaloteho on noin 4,3 MW. Mitoituspaloista on käyty neuvottelu paikallisen paloviranomaisen kanssa.

Taulukko 8. Paloskenaariot ja niiden lähteet.

Tapaus	Paloskenaario	Lähde
1	Esiintymislavan palo	Näyttämöpalo. (Hietaniemi 2007, s. 53-58)
2	Myyntikojujen palo	Myyntikoju. (Hietaniemi 2007, s. 53)
3a	Katsomopalo 600 kW/m^2	Muovituolikatsojamon palo (Hietaniemi 2007 s.41)
3b	Katsomopalo 750 kW/m^2	Muovituolikatsojamon palo (Hietaniemi 2007, s.42)

5.3 Laskelmat

Pelastuslaitoksen toimintavalmiusajalla voidaan arvioida palokunnan sammutustoimien alkamista tiedon siirrettyä hätäkeskukseen. Luottamusvälitarkastelulla määritetään riski

väärän johtopäätöksen tekemiselle. 95 %:n luottamusväli lasketaan tilastollisen merkitsevyyden laskennalla. Tarkasteltaessa rakennuspalojen määriä, luottamusväli kertoo havaintoaineistosta lasketun vaihteluvälin. Varmuus oikean rakennuspalojen määrälle on 95 %. Luottamusvälien poiketessa toisistaan on rakennuspalojen määrien ero tilastollisesti merkittävä. Toimintavalmiusajan kertymäkuvaajat eri pelastustoimien alueilla on esitetty lähteessä. Toimintavalmiusajat on määritetty ensimmäisen ajoneuvon hälyttämisestä sen saapumiseen kohteeseen vahvuudella 1+3. (Kokki ym., s. 12-13, 69-72. Toimintavalmiusaika ei vaikuta simulointeihin, mutta käytännön tasolla yhdessä sprinklauksen kanssa sillä on merkitystä tulipalon vahinkoihin.

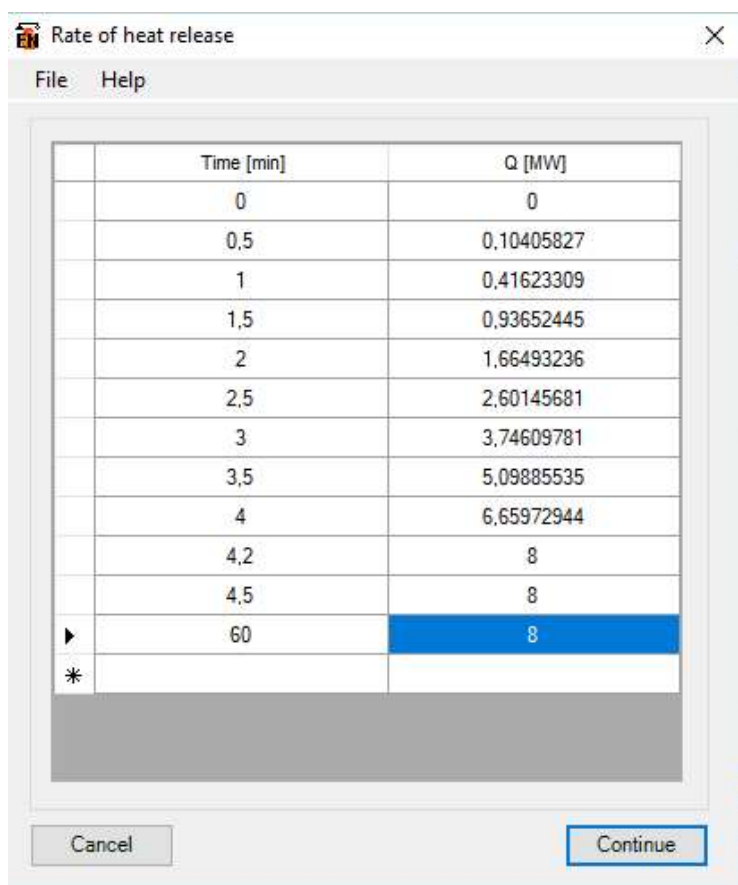
Palotapausten simuloinnissa huomioitiin sprinklauksen vaikutus katkaisemalla palonkehitys sprinklerin laukeamislämpötilassa 68°C. Laskentaa jatkettiin vakioaloteholla laskenta-ajan loppuun saakka. Simuloinnissa seurattiin tilan palokaasun lämpötilaa sekä teräsrakenteiden lämpötilakehitystä. Palot paikoitettiin rakenteiden kannalta epäedullisimpaan kohtaan.

5.3.1 ELEFIR-EN:

Tässä työssä FDS palosimulointitulosten lisäksi esitetään vertailutulokset ELEFIR-EN ohjelmalla määritettyjen paikallisen palojen myötä. ELEFIR-EN pohjautuu OZoneen, jolla tarkastelu on mahdollista suorittaa, mutta OZonen teräsprofiilikirjasto ei sisällä suorakaideprofiileja. Vertailulaskenta suoritetaan ELEFIR-EN -ohjelmalla.

Päävalikosta valitaan tarkasteltava tilanne -Temperature function of time ja Temperature of fire compartment and steel. Ohjelma suorittaa kaiken laskennan Eurokoodi 3:n mukaisesti. Yläpaarteen profiiliksi ja poikkileikkaukseksi määritetään RHS 250 x 150 x 12.5 hiiliteräs. Vastaavasti alapaarteen profiiliksi ja poikkileikkaukseksi RHS 250 x 150 x 8.0 hiiliteräs.

Kuva 5. Käsien syötetty paloteho ajan [min] funktiona ELEFIR-EN ohjelmaan.



Time [min]	Q [MW]
0	0
0,5	0,10405827
1	0,41623309
1,5	0,93652445
2	1,66493236
2,5	2,60145681
3	3,74609781
3,5	5,09885535
4	6,65972944
4,2	8
4,5	8
60	8
*	

Määritetään tarkasteltavaksi ajanjaksoksi 60 min. Paloaltistus on kaikilta sivuilta, eikä rakenteellisia passiivisuojauksia ole. Luodaan Heskestadin mukainen paikallinen palo, jossa liekki ei osu kattoon. Käytetään palotehon määritettyjä arvoja, mutta maksimi arvo pyöristetään ylöspäin kokonaiseen lukuun, koska ELEFIR-EN pyöristää sen alaspäin, eikä se ole varmalla puolella. Ohjelmaan syötetään korkeusmitta palolähteestä kattoon ja maksimipinta-ala palolle. Lisätään lisäksi myös korkeus, jossa lämpötila lasketaan. ELEFIR-EN -ohjelma tekee automaattisesti raportin laskennasta, jossa tulokset esitetään graafisesti ja numeerisesti. Tiedot kriittisistä lämpötiloista on saatu teräsrakennesuunnittelijalta, joka on suorittanut rakennelaskennan kyseiseen kohteeseen.

5.3.2 PyroSim

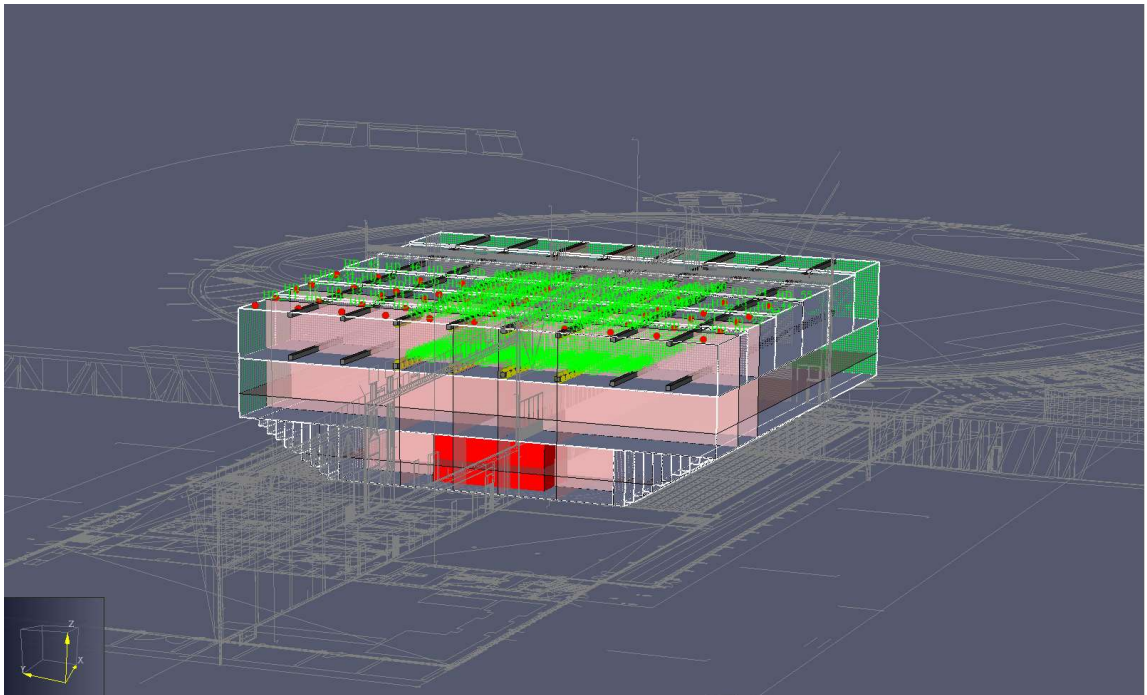
Mallinnettavan tilan ARK-pohjat voidaan tuoda PyroSim-ohjelmistoon, jolloin mallin luominen on helpompaa. Aluksi malliin luodaan geometria, johon lisätään pintojen materiaalit. Lattia on valettu betonista ja seinämateriaalia on kahdenlaista

pelti-villa-pelti-elementti ja betoniseinä. Katsomonrunko ja ristikon paarteet on terästä. Korvausilmalle luodaan pieni aukko avoimella reunaehdolla tilan alareunaan, jolloin happea on saatavilla palonkehittymisen kannalta riittävästi.

Taulukko 9. Pintojen ominaisuudet.

	Tiheys [kg/m ³]	Emissiivisyys	Ominaislämpö [kJ/(kg*K)]	Lämmönjohtavuus [W/(m*K)]
Teräs	7850	0,7	1,04	1,8
Betoni	2280	0,7	0,46	45,8
Pelti-Villa-Pelti	208	0,7	-	-

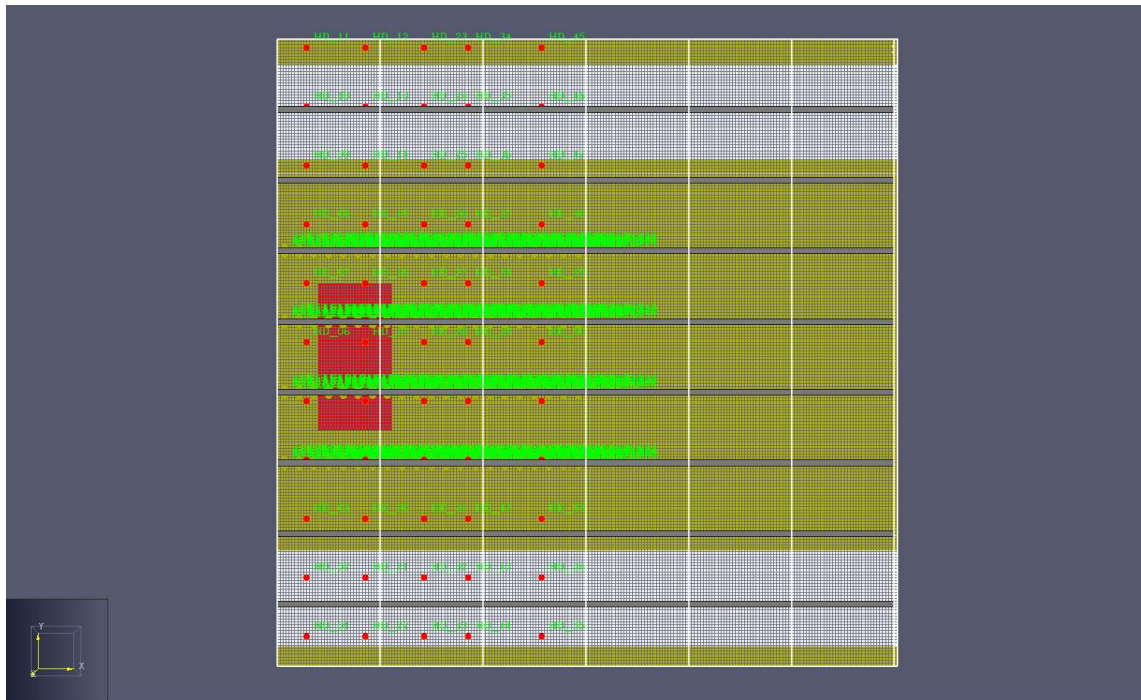
Kuva 6. Valmis malli laskentaan.



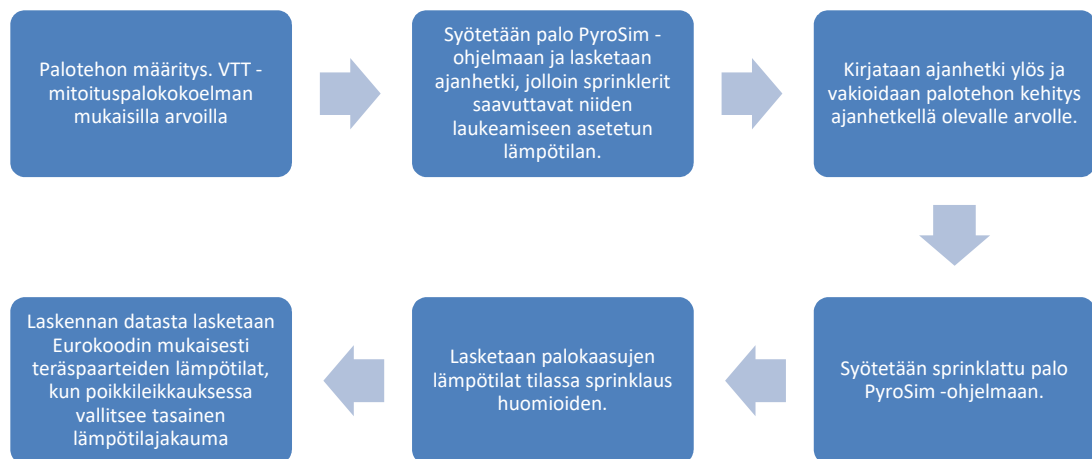
Kun mitoituspälo on määritetty ja hyväksytetty pelastusviranomaisella, voidaan suorittaa paloteston määrittä VTT -mitoituspälokokoelman mukaisilla arvoilla tapauskohtaisesti. Määritetty palotest kokonaisuudessaan syötetään PyroSim -ohjelmistoon, josta Fire Dynamic Simulator laskee palotapahtuman. Sprinklereiden sijaintien paikalle malliin sijoitetaan lämpötila-anturit, joista saadaan ”nollalaskennassa” määritettyä ajanhetki, jolloin sprinkleri laukeaa esimerkiksi 68 °C asteen lämpötilassa. Sprinklereiden sijainnit on määritetty standardin SFS-EN 12845 kappaleessa 12 sprinklerien sijoitus ja sijoitustiheys -mukaisesti. Anturit on liitetty control -toimintoon, jolloin minkä tahansa lämpötila-anturin saavuttaessa sprinklereiden laukeamislämpötilan, reagoi se dataan vaihtaen merkin 0:sta 1:een. Näin voidaan löytää ajanhetki, jolloin sprinklaus voidaan ottaa huomioon paloteston kehityksessä. Tässä työssä se tehdään vakiomalla palotest tälle tasolle. Korjattu data syötetään uudelleen PyroSim -ohjelmaan ja laskenta suoritetaan FDS -ohjelmalla tässä tapauksessa 30 minuutin ajalla.

Paarteiden sivuille suoraan palavan kohteen yläpuolelle on sijoitettu lämpötila-anturit, joiden mittaamista lämpötiloista valitaan keskiarvoistetusti suurimman lämpötilan mukainen lämpötila-anturi, jonka datasta lasketaan ala- tai yläpaarteen lämpötilat. Sekä ala- että yläpaarteesta otetaan yhden anturin data käsittelyyn. Laskennan tulokset on esitetty tässä esimerkissä. Laskentojen jälkeinen data on yhteensopiva liitettäväksi Excel -ohjelmistoon, jossa data käsitellään ja lasketaan Eurokoodin mukaisesti teräsrakenteisten paarteiden lämpötilat. Elementtiverkon koko on tässä mallissa 0,2 x 0,2 x 0,2 m.

Kuva 7. Sprinklereiden ja esiintymislavan sijoitus ylhäältäpäin kuvattuna.



Kuva 8. Palosimuloinnin prosessikaavio.



5.4 Tulosten tarkastelu

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa paloteho määritettiin kohteeseen laskennallisesti ja sen kehitys syötettiin FDS-ohjelmistoon, joka laskee rakenteiden adiabaattisen pintalämpötilan AST tapauskohtaisesti.

Esiintymislavan palotehossa esiintyy piikki palotehossa ja sitä seuraava pudotus, minkä jälkeen laskenta jatkaa vaihetta edeltävän laskennan mukaisesti. Sillä ei ole kuitenkaan merkittävää vaikutusta tuloksiin. Rakenteiden adiabaattisten pintalämpötilojen maksimiarvot on mitattu palotehon saavuttaessa suurimman arvonsa ja teräsprofiilin lämpötilan kehitys on laskettu Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 kaavan 4.2.5 mukaisesti. Laskenta lopetettiin 30 minuutin jälkeen, jolloin paloteho oli jatkanut vakioteholla ja palokaasujen lämpötilakehitys tasaantunut. Teräsrakenteiden lämpötilat ovat kaikissa tutkituissa rakenteissa selkeästi alempana kuin kriittisiksi lämpötiloiksi määritetyt lämpötilat. Alla oleviin taulukoihin on koottu kunkin paloskenaarion laskelmat FDS ja ELEFIR-EN ohjelmilla. Taulukoissa on tarkasteltu palokaasujen ja teräsrakenteiden lämpötiloja ylä- ja alapaarteissa.

Taulukko 10. Esiintymislavan paloskenaarion palokaasujen sekä tarkasteltavien teräsrakenteiden lämpötilat.

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	163	80
Teräs (Yläpaarre)	108	77
Palokaasut (AP)	158	113
Teräs (Alapaarre)	131	107

Taulukko 11. Myyntikojujen paloskenaarion palokaasujen sekä tarkasteltavien teräsrakenteiden lämpötilat.

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	75	76
Teräs (Yläpaarre)	44	63
Palokaasut (AP)	156	128
Teräs (Alapaarre)	114	117

Taulukko 12. Katsomopalo 600 kW/m² paloskenaarion palokaasujen sekä tarkasteltavien teräsrakenteiden lämpötilat.

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	52	60
Teräs (Yläpaarre)	34	45
Palokaasut (AP)	73	97
Teräs (Alapaarre)	50	78

Taulukko 13. Katsomopalo 750 kW/m² paloskenaarion palokaasujen sekä tarkasteltavien teräsrakenteiden lämpötilat.

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	63	75
Teräs (Yläpaarre)	39	57
Palokaasut (AP)	70	126
Teräs (Alapaarre)	53	110

Yleisesti ELEFIR-EN tulokset ovat ns. varmalla puolella, jos ELEFIR-EN ohjelmaa käytettäisiin nopeaan tarkasteluun projektin alkuvaiheessa. Tällöin voitaisiin arvioida, voisiko kohteeseen olla järkevää tehdä palosimulointia.

Seuraavissa kuvissa 9-28 on esitetty valmis palosimulointimalli laskentaan. Jokaisesta tarkasteltavana olleesta paloskenariosta on otettu myös kuva palosimulointimallista 30 minuutin tarkastelun jälkeen. Palotehokäyrävertailu on luotu jokaiselle tapaukselle siten, että tapauksen normaalipalotehokehitys on esitetty sinisellä, mutta kohteessa olevan sprinklerin ansiosta paloteho voidaan rajoittaa tehokkaasti punaisen käyrän mukaisesti, kun on tutkittu jokaiselle paloskenariolle, milloin sprinkler kohteessa laukeaa. Palotehokäyrät syötetään palosimulointimalliin ja koska on haluttu varmistaa, että

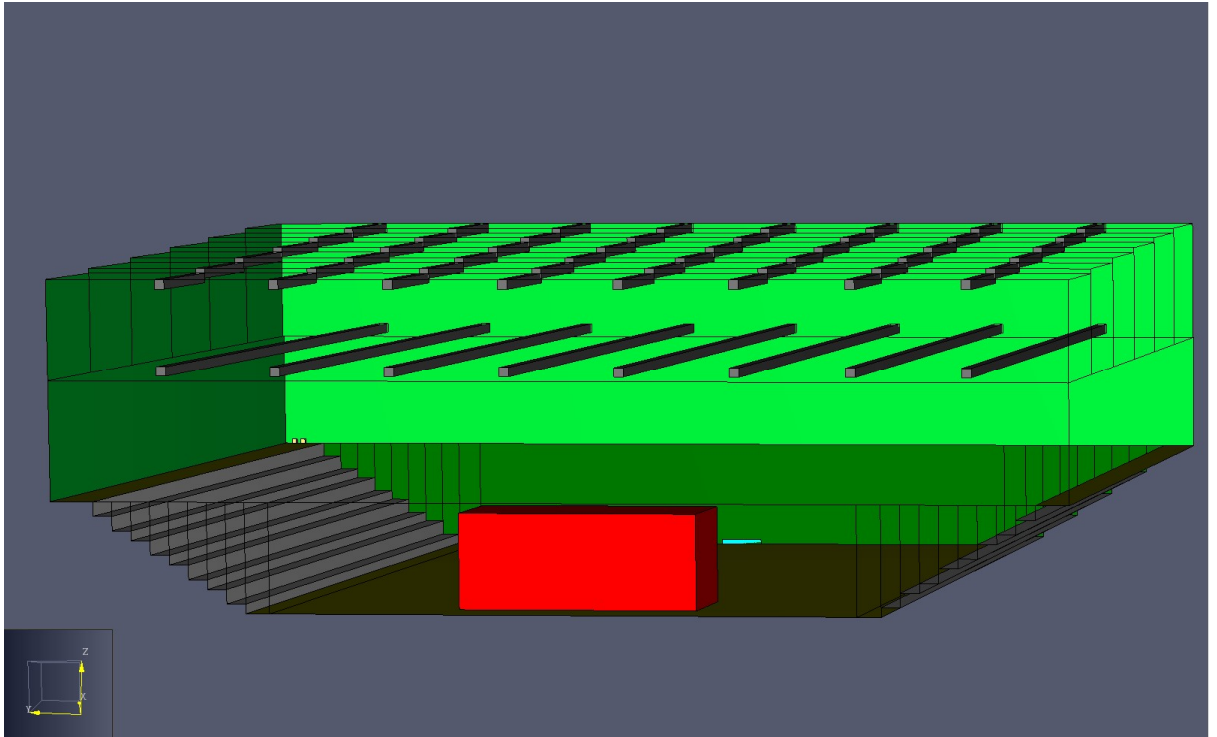
laskenta ohjelmistossa sujuu oletetun mukaisesti, palotehokäyrät on piirretty samaan kuvaajaan jokaisessa tapauksessa. Ne näyttävät hyvin seuraavan toinen toisiaan, joten laskenta on oletetun mukaista. Tarkasteltavana olleissa teräsristikoissa ala- ja yläpaarteiden maksimiarvon lämpötilakehitys teräsprofiilissa ja AST-lämpötilat on jokaisessa tarkasteltavassa tapauksessa esitetty kuvissa.

Tuloksista voidaan yleisesti huomata, että sprinklaus rajoittaa paloa tehokkaasti, sillä palotehoa voidaan rajoittaa sen ansiosta. Tässä työssä on esitetty myös koetuloksiin perustuvia sprinklauksen vaikutuksia palotehokäyriin, jotka laskevat huomattavasti sprinklauksen lauettua. Varmuutta tässä työssä sprinklauksen huomioon ottamiseen saadaan rajoittamalla tapauksen paloteho vakioksi sprinklauksen käynnistymisestä. Lämpötilat jäävät teräsrakenteissa alhaisiksi jokaisessa tarkasteltavana olleessa tapauksessa. Palosimuloinnit on tehty luotettavalla ohjelmistolla kokeneiden suunnittelijoiden avustamana ja mallinnuksessa on käytetty konservatiivisia oletuksia, jotta saavutetaan riittävä varmuus tuloksille.

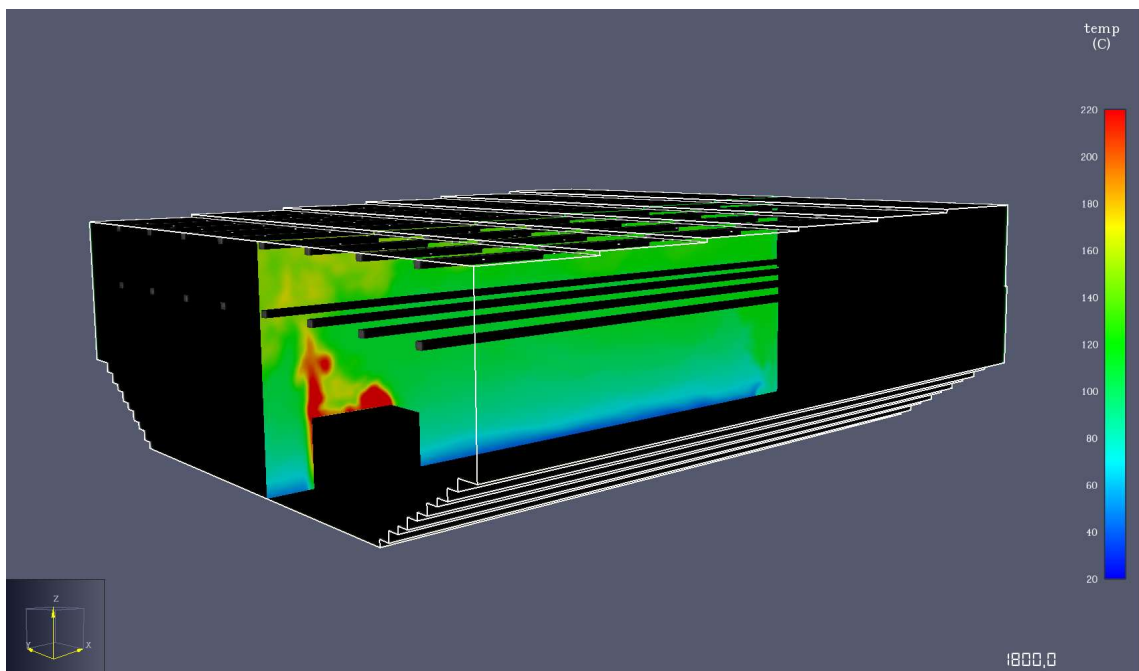
Työssä on voitu osoittaa, että lämpötilat eivät nouse tässä työssä tarkasteltavissa paloskenaarioissa korkeaksi. Kohdekohtainen tarkastelu mahdollistaa paremman turvallisuustason rakennuksessa henkilöturvallisuuden ja sitä kautta myös taloudellisten, aineellisten ja rakenteellisten vahinkojen osalta. Tulosten perusteella rakenteet kestävät palotilanteille asetetut vaatimuksen ilman palosuojausta ja riittävä paloturvallisuus saavutetaan, minkä myötä kustannussäästöt ovat mahdollisia.

5.4.1 Tapaus 1: Esiintymislavan palo

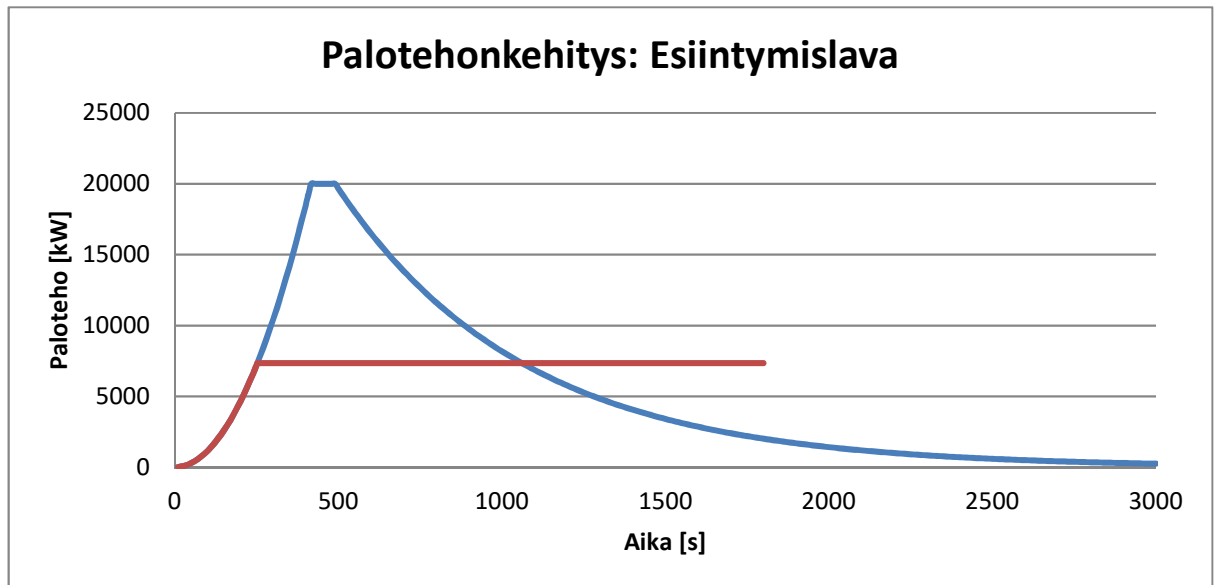
Kuva 9. Esiintymislavan palo. Mallin takaseinässä näkyy korvausilman aukko.



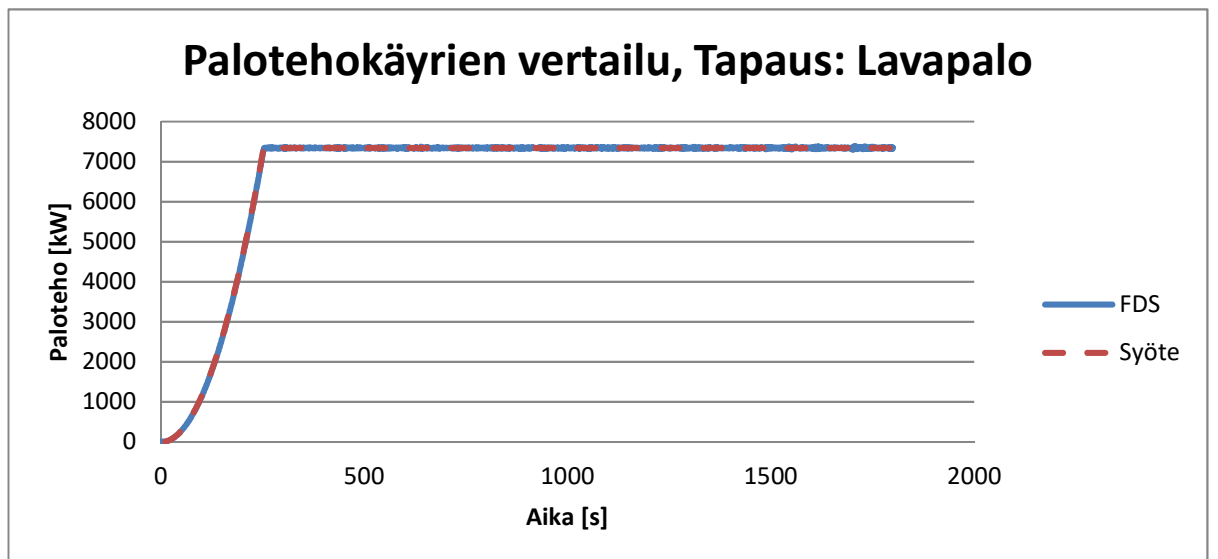
Kuva 10. Esiintymislavan palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.



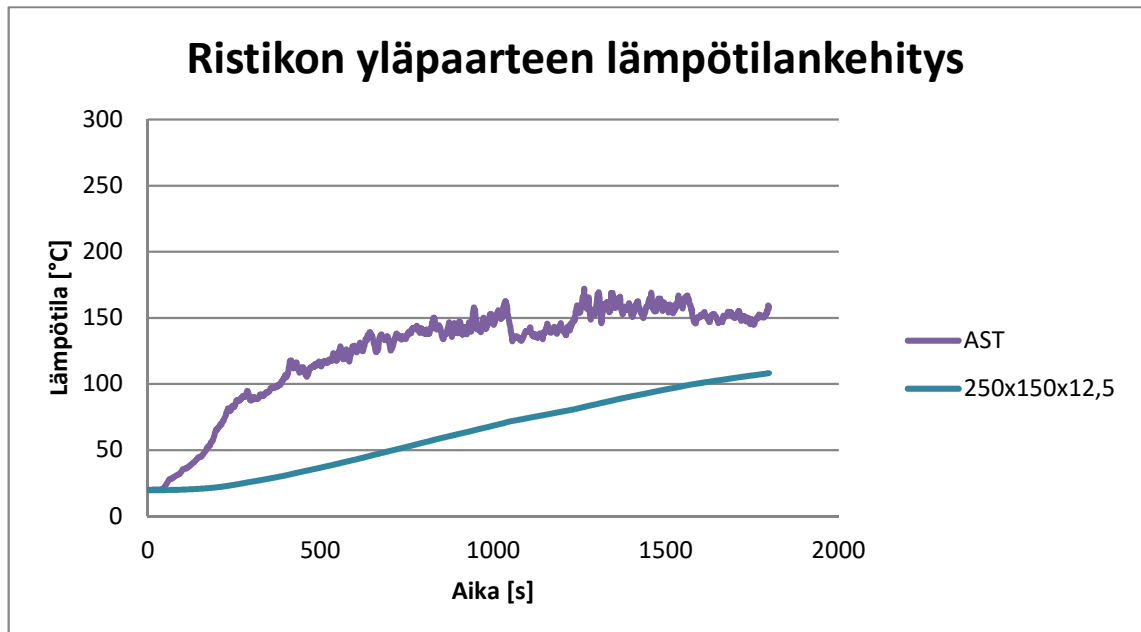
Kuva 11. Esiintymislavan palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



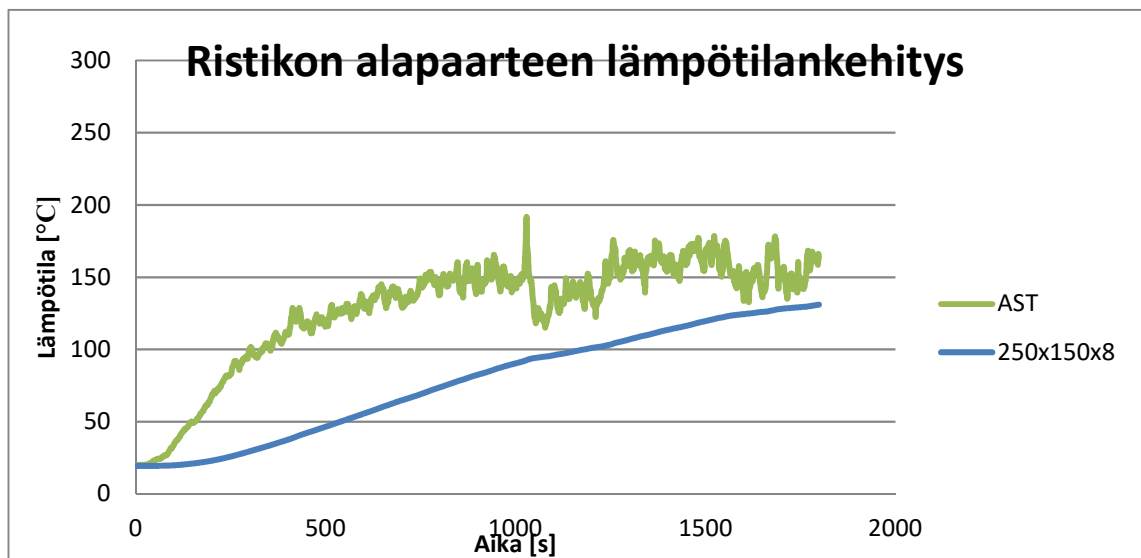
Kuva 12. Palotehokäyrien vertailu esiintymislavan palon tapauksessa. FDS on laskenut syötetyn palotehon mukaisesti.



Kuva 13. Ristikon yläpaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa esiintymislavan palossa.

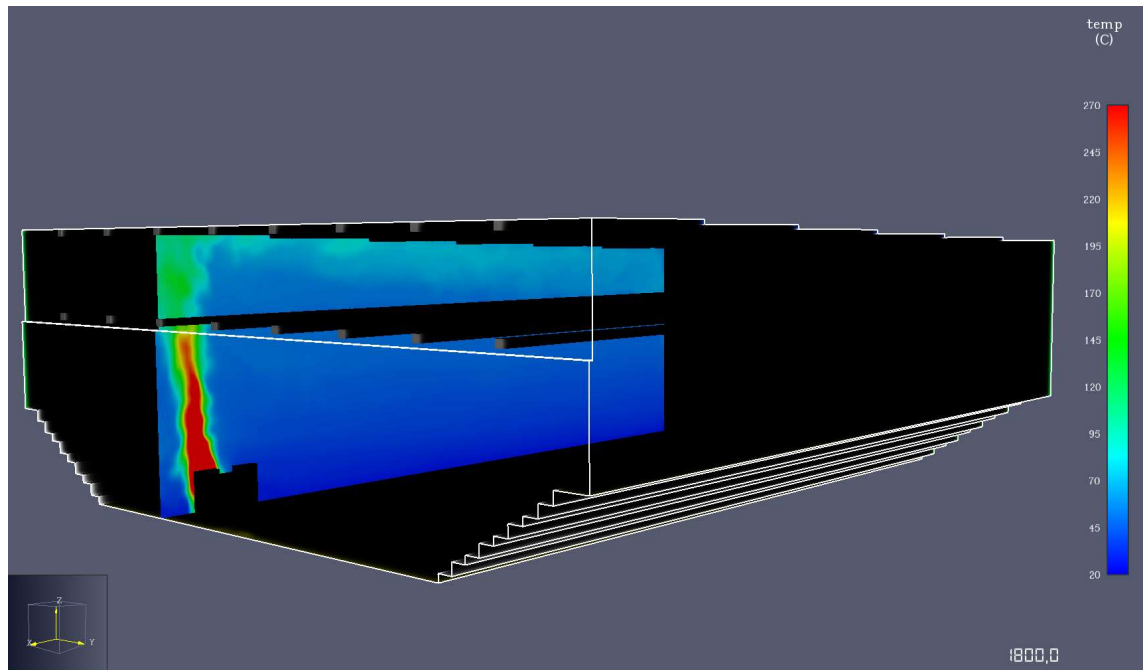


Kuva 14. Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa esiintymislavan palossa.

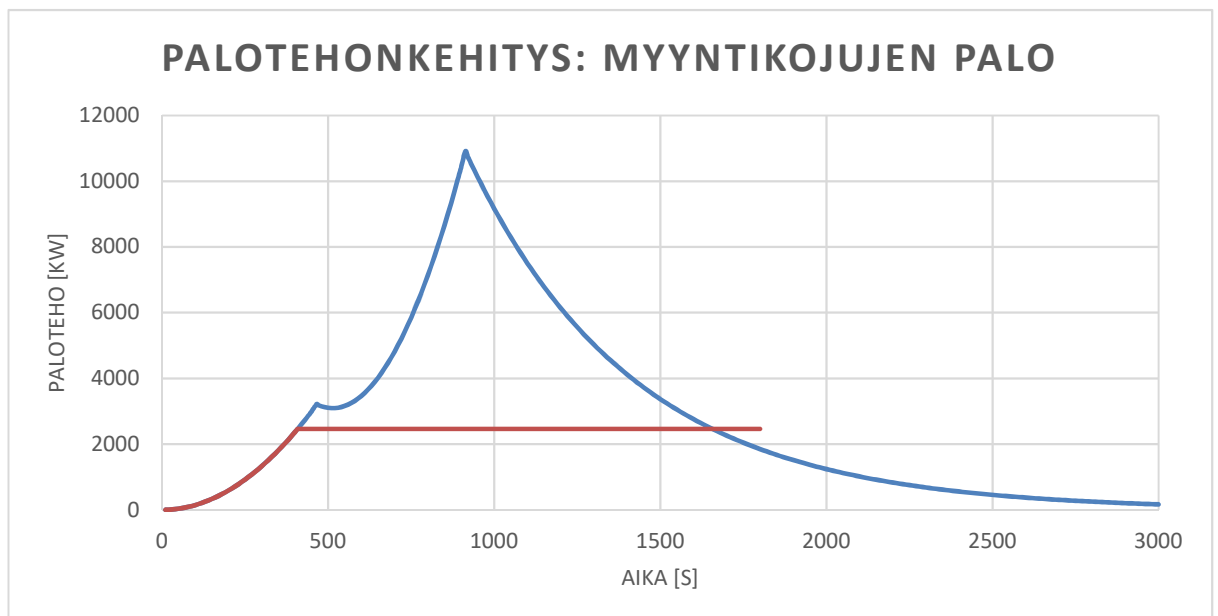


5.4.2 Tapaus 2: Myyntikojujen palo

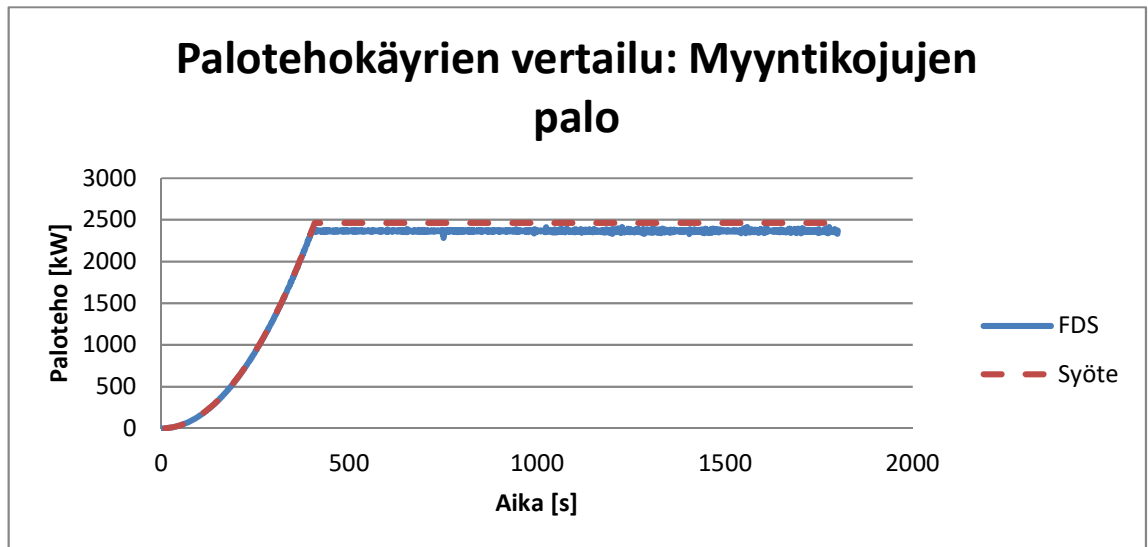
Kuva 15. Myyntikojujen palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.



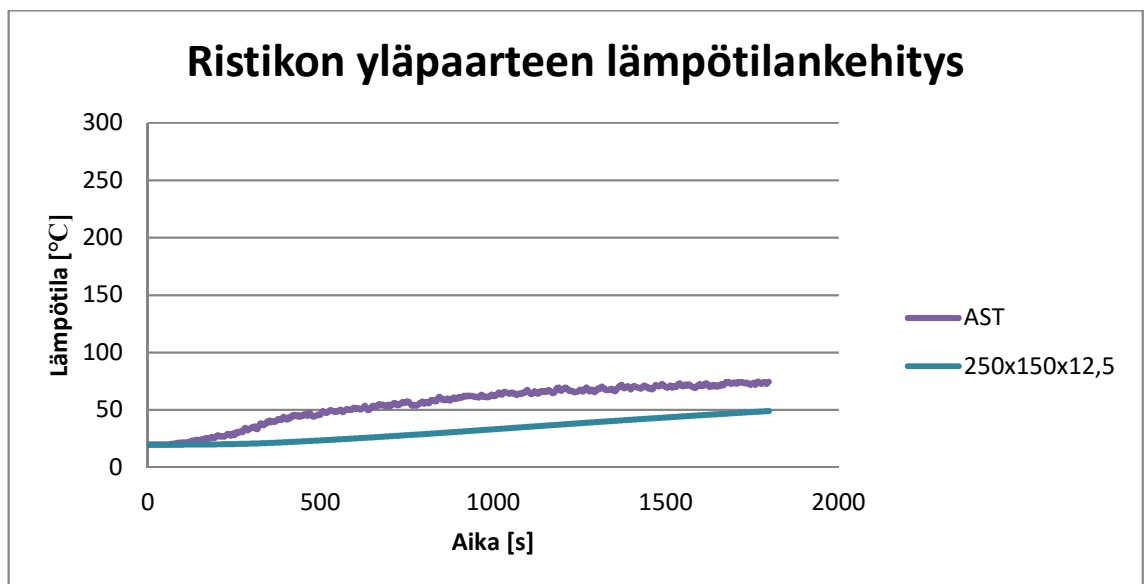
Kuva 16. Myyntikojujen palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



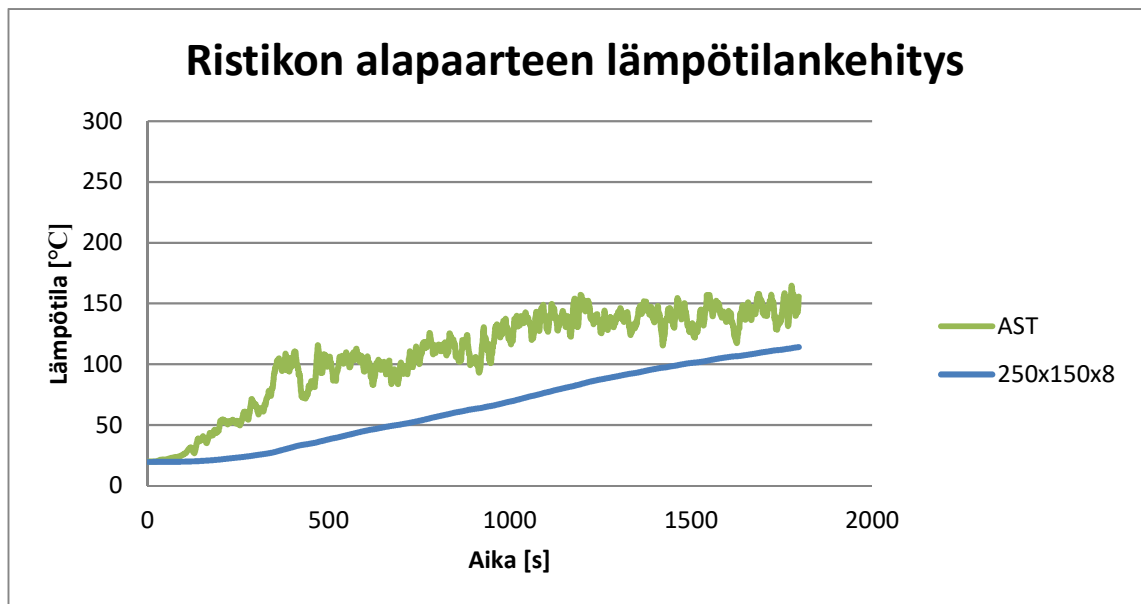
Kuva 17. Palotehokäyrien vertailu myyntikojujen palon tapauksessa. FDS on laskenut syötetyn palotehon mukaisesti.



Kuva 18. Ristikon yläpaarteen adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa myyntikojujen palossa.

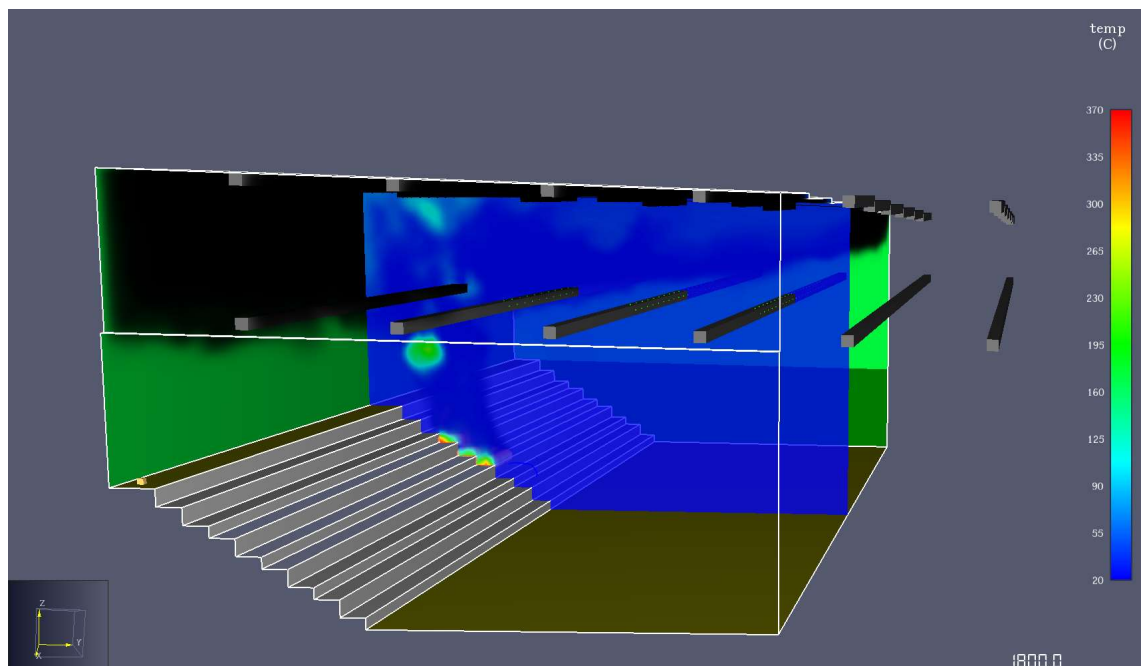


Kuva 19. Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa myyntikojujen palossa.

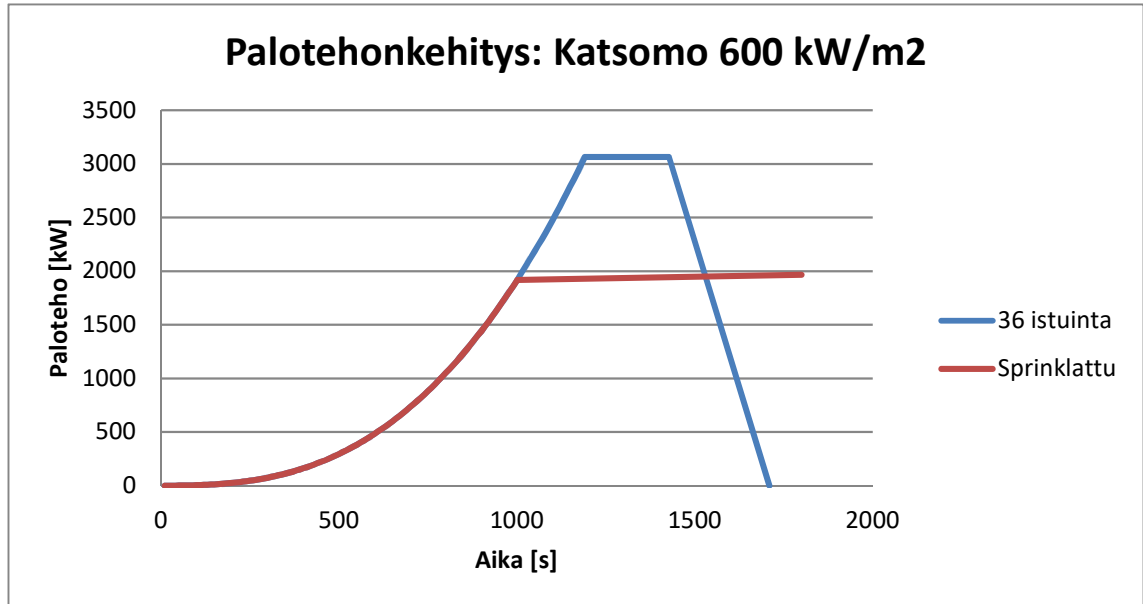


5.4.3 Tapaus 3a katsomopalo

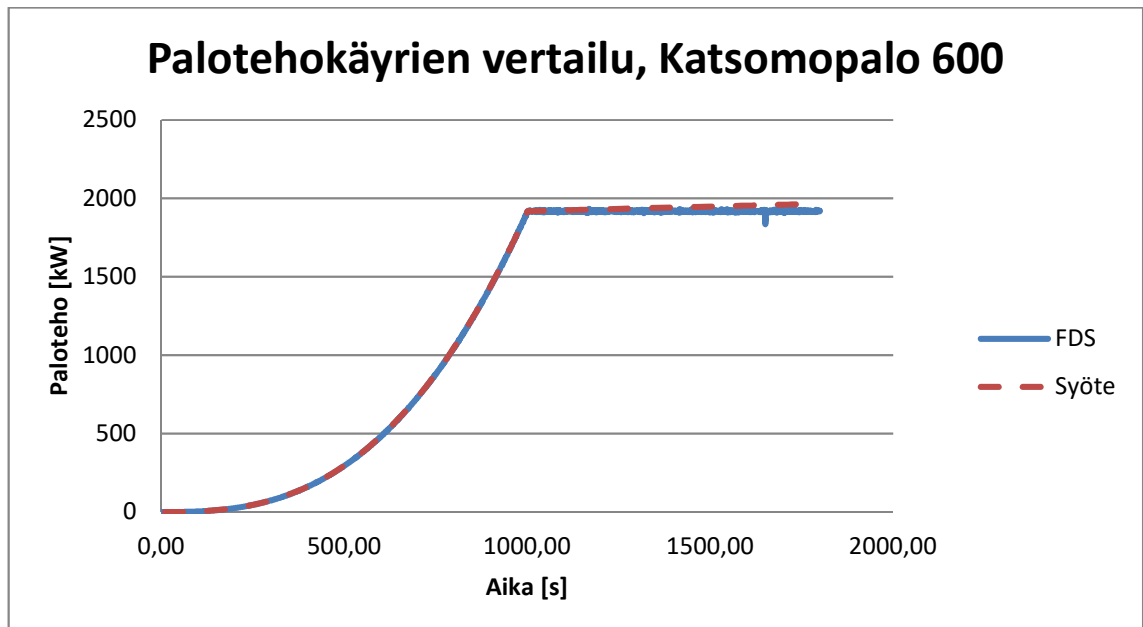
Kuva 20. Katsomopalojen palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.



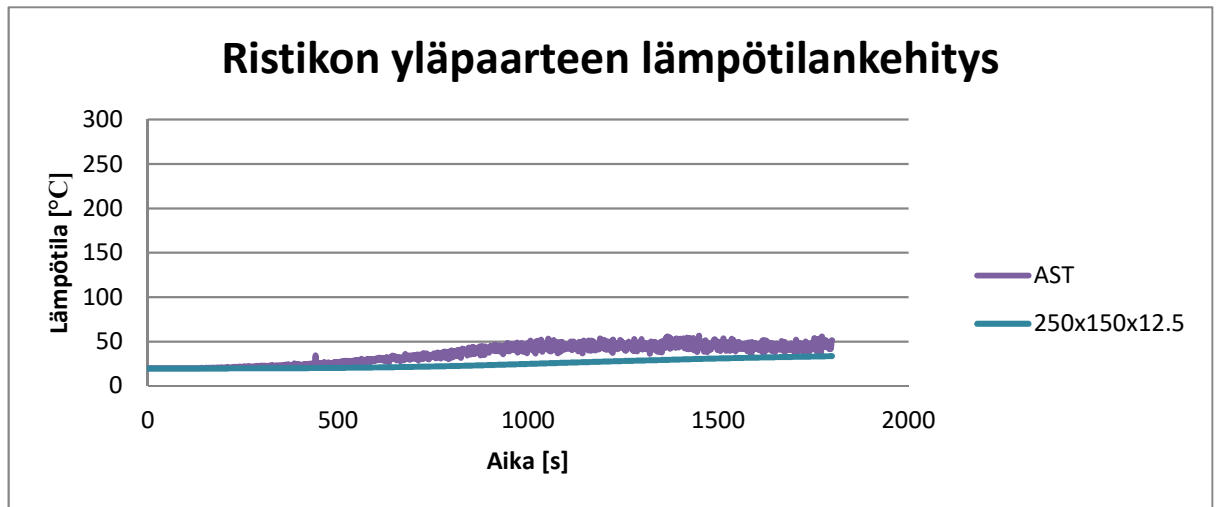
Kuva 21. Katsomopalon 600 kW/m^2 palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



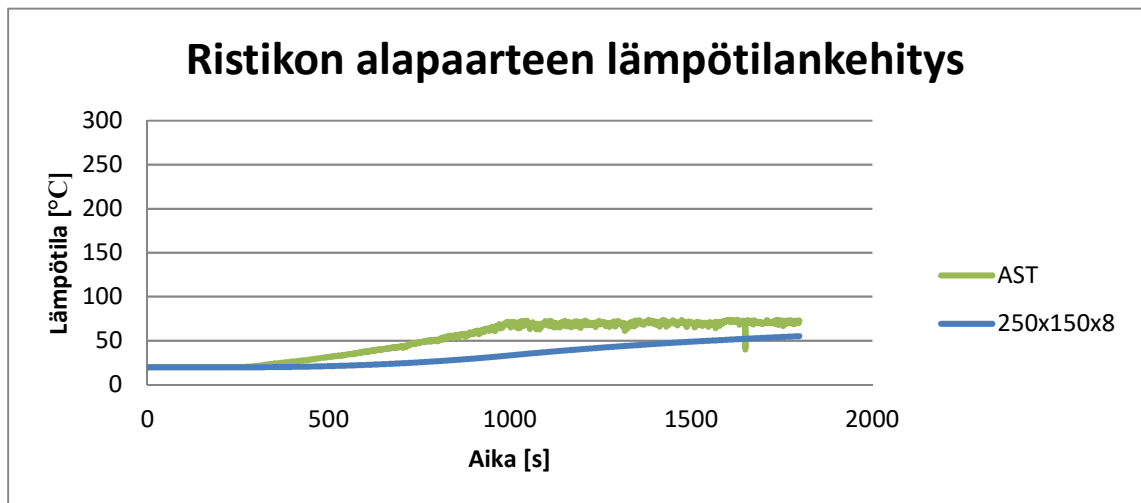
Kuva 22. Katsomopalon 600 kW/m^2 palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



Kuva 23. Ristikon yläpaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon 600 kW/m² palossa.

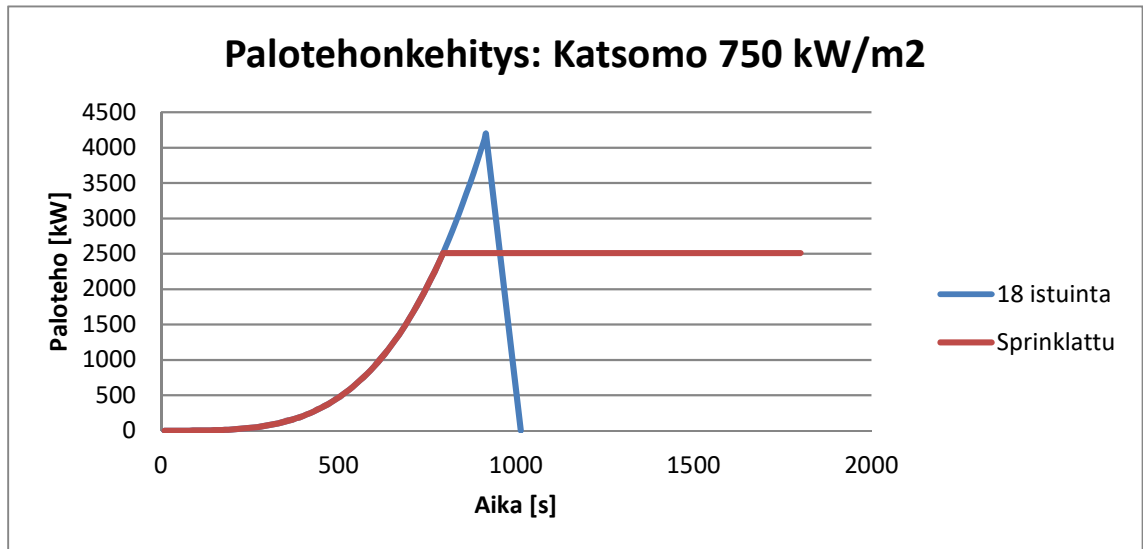


Kuva 24. Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon 600 kW/m² palossa.

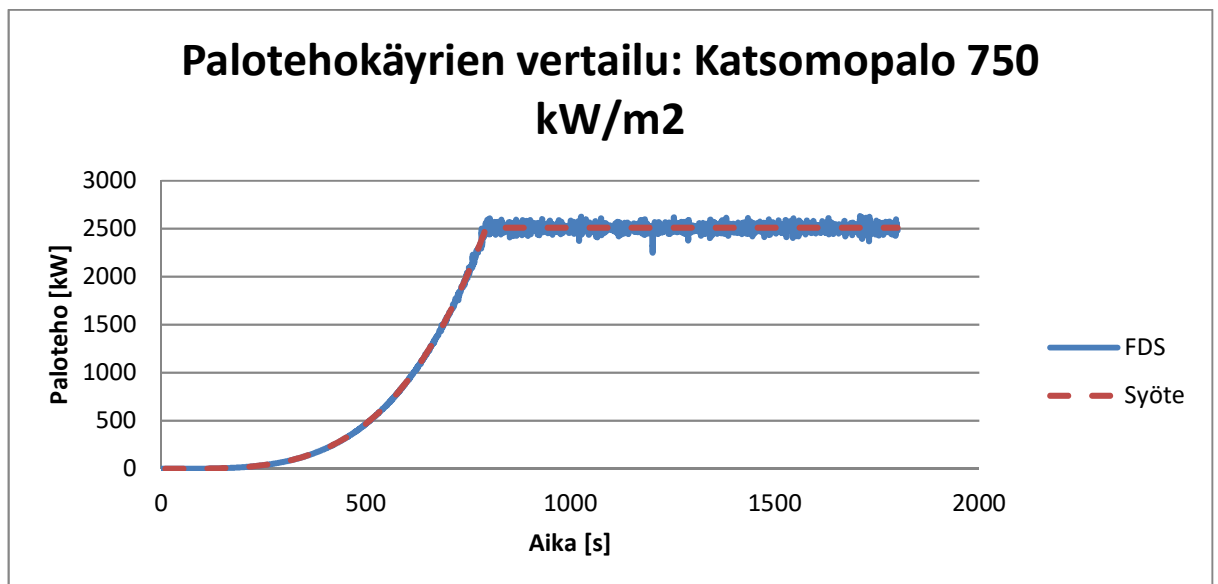


5.4.4 Tapaus 3b Katsomopalon herkkyystarkastelu

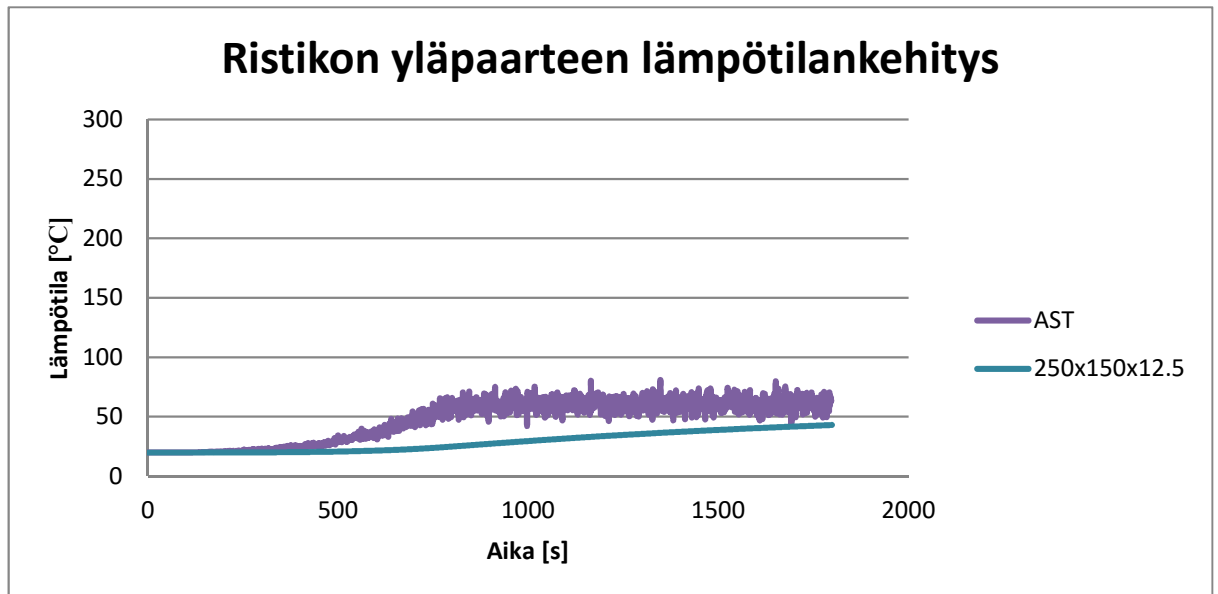
Kuva 25. Katsomopalon 750 kW/m^2 palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



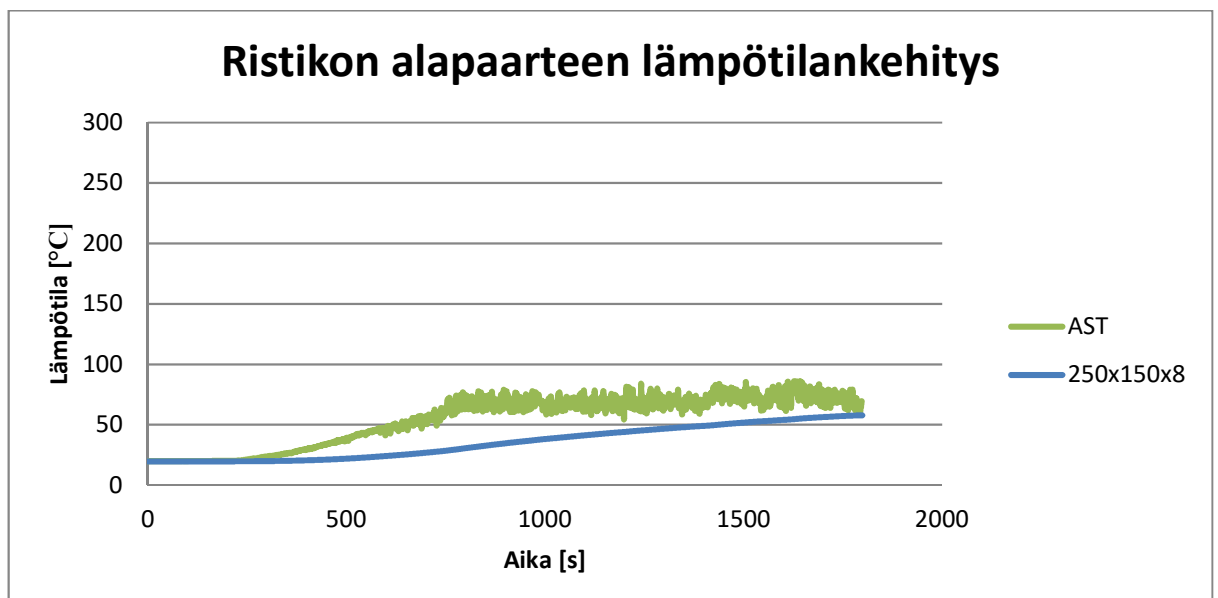
Kuva 26. Katsomopalon 750 kW/m^2 palomallin mukainen sininen palotehokäyrä ja sprinklauksen vaikutus palotehossa.



Kuva 27. Ristikon yläpaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon 750 kW/m² palossa.



Kuva 28. Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys AST ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon 750 kW/m² palossa.



6 YHTEENVETO

Taulukkomitoituksella standardipalon lämpötila-aikakäyrää käyttämällä voidaan päätyä tulokseen, joka on hyvin karkea verrattuna oletetun palonkehityksen suunnittelun mukaisiin tuloksiin. Tunnistamalla tapaukset, joissa toiminnallista mitoitusta voidaan käyttää, saavutetaan huomattavia hyötyjä, kun teräsrakenteet voidaan suunnitella suojaamattomina ja normaalilämpötilamitoituksen mukaisesti. Oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun avulla voidaan tutkia todenmukaisia tilanteita tapauskohtaisesti ja siten parantaa rakennuksen kokonaisturvallisuutta, jonka myötä voidaan saavuttaa yhtä hyvä tai parempi turvallisuustaso vertaamalla standardipalon mukaiseen suunnitteluun. Kohdekohtainen tarkastelu mahdollistaa paremman turvallisuustason rakennuksessa henkilöturvallisuuden ja sitä kautta myös taloudellisten, aineellisten ja rakenteellisten vahinkojen osalta.

Paikallisten palojen ja palosimuloinnissa käytettävien palojen mallintamiseen voidaan hyödyntää kohdekohtaisesti VTT:n mitoituspaloeläimässa (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007) esitettyjä palotapauksia. Esimerkkikohteen tuloksia tarkastellessa huomataan, että tarkasteltavaan liikuntasaliin sijoitetut mahdollisten paloskenaarioiden mitoituspalojen lämpötilat eivät saavuta teräsrästiköille laskettuja kriittisiä lämpötiloja. Myöskään 400 °C:een lämpötilaa ei saavuteta, jolloin teräsrakenteiden lujuusominaisuudet alkaisivat heiketä. Yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa on tutkittu, etteivät epäsuorat vaikutukset ole merkittäviä tässä kohteessa. Tulosten perusteella rakenteet kestävät palotilanteille asetetut vaatimukset ilman palosuojausta ja riittävä paloturvallisuus saavutetaan, minkä myötä kustannussäästöt ovat mahdollisia.

Käytössä olevilla ohjelmistoilla voidaan huomioida palonkehitys kohdekohtaisesti osaavan henkilön toimesta, jolloin myös sprinklauksen vaikutukset voidaan ottaa huomioon. Oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun selvitykset on liitettävä rakennuslupa-asiakirjoihin. Selvityksistä on käytävä ilmi lähtötiedot rakennuksesta ja tehdyt olettamukset perusteluineen. Myös suunnittelussa käytettävät menetelmät ja niiden kuvaus, jossa esitetään laskenta- ja koemenetelmien soveltuvuus rajoituksineen. Liitteisiin kuuluvat myös saadut tulokset herkkyyssanalyysineen, hyväksymiskriteerit ja tulosten vertailu niihin, sekä analyysien ja johtopäätösten esittäminen viranomaisille. Esitetöpaperi ja raportti laaditaan viranomaisyhteistyön sekä tarkastusprosessin

parantamiseksi. Pelastussuunnitelmassa, sekä huolto- ja käyttöohjeessa huomioidaan oletetun palonkehityksen suunnittelu.

Jatkotutkimuksissa olisi mielenkiintoista selvittää, mitkä seikat vaikuttavat ohjelmiston laskennan tulosten tarkkuuteen ja laskenta-aikaan, sillä aikaa voi kulua viikko, ennenkuin FDS -laskenta saadaan valmiiksi esimerkin kaltaisissa kohteissa. Toisena jatkotutkimusaiheena voisi selvittää, miten kustannukset eroavat taulukkomitoituksen ja oletettuun palonkehityksen välillä. Tämän diplomityön tekijänä aion paneutua lähitulevaisuudessa myös SAFIR -ohjelmaan ja ottaa selvää sen mahdollisuuksista.

Tämänkin työn lähteenä käytetyssä Rakennusinsinööriliiton julkaisemassa RIL 221-2003 -kirjassa esitetään paloturvallisuusvaatimukset sekä paloturvallisuuden suunnittelun ja ylläpitämisen yleiset perusteet. Lisäksi kirjassa on oletettuun palonkehitykseen perustuvaa suunnitteluprosessia ja havainnollistavia esimerkkejä rakennusten ja rakenteiden paloturvallisuussuunnittelusta. Se on vielä tänä päivänäkin käyttökelpoinen materiaali rakennuksen tulevalle käyttäjälle, suunnittelijalle ja viranomaiselle aiheeseen tutustumiseen, mutta kirja on vuodelta 2003, minkä vuoksi se olisi hyvä päivittää, koska laki ja määräykset ovat muuttuneet ajan myötä. Jatkossa saadaan toivottavasti myös jokin yhtenäinen tapa tehdä oletettuun palonkehitykseen perustuvaa suunnittelua, sillä toimintatavat ympäri Suomea saattavat poiketa toisistaan.

7 LÄHDELUETTELO

2013. BFS2013:12 BBRAD3, Boverkets författningssamling.

Franssen J & Vila Real P. 2010. Fire Design of Steel Structures: Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Eurocode 3: Design of steel structures. 1st edition. Berlin: ECCS Eurocode design manuals, Ernst & Sohn. (428) s. ISBN 978-92-9147-099-0

Evans, D. D. 1992. Sprinkler Suppression Algorithm for HAZARD. Proceeding 12th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel for Fire Research and Safety. Tsukuba, Japan: Building Research Institute, (7) s. Saatavissa: <https://ia800603.us.archive.org/11/items/sprinklerfiresup5254evan/sprinklerfiresup5254evan.pdf>

Hamins, A. & McGrattan, K.B. 1999. Reduced-Scale Experiments to Characterize the Suppression of Rack Storage Commodity Fires. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, Technical Report NIST Internal Report (NISTIR 64391) (35) s. Saatavissa: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6439.pdf>

Hyttinen V., Tolonen P. & Väisänen T., 2014. Palofysiikka. Kuopio: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö, (291) s. ISBN 978-951-797-553-7

Junnonen J. & Kankainen J. 2017. Rakennuttaminen. 5. korjattu painos. Helsinki: Rakennustieto OY, (127) s. ISBN 978-952-267-145-5

Lehtimäki S. & työryhmä, 1997. Palotekninen erityissuunnittelu vyöhykemalleja käyttäen. Padasjoki: Suomen pelastusalan keskusjärjestö, (80) s. ISBN 951-797-043-9

Maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL), (5.2.1999/132), Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L20P149d>

Madrzykowski, D. & Vettori, R. L. 1992. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. Washington D.C, USA: National Institute of

Standards and Technology. NISTIR 4833 (49) s. Saatavissa:
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir4833.pdf>

Hostikka S., Floyd J., MacGrattan K., McDermott R. & Vanella M., 2019. Fire Dynamics Simulator, User's Guide. Special Publication 1019 Sixth Edition. USA: National Institute of Standards and Technology NIST ja VTT, (361) s. Saatavissa:
https://github.com/firemodels/fds/releases/download/FDS6.7.3/FDS_User_Guide.pdf

Nieminen M., 2018. Rakennusten automaattisten sprinklerilaitteistojen luotettavuus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa:
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25673/nieminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nystedt F., 2011. Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings. Lund, Ruotsi: Lund University (126) s. Saatavissa:
<https://portal.research.lu.se/portal/files/3912725/1832676.pdf>

Outinen J. Ruukki Construction Oy, 2013, Teräsrakenteiden paloturvallisuuden tutkimus ja tuotekehitys. Teräsrakentamisen T&K päiviltä 28-29.5.2013 Saatavissa:
http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/99/73e62b9/jyri_outinen_tk_2013.pdf

OZone V3 user manual. Saatavissa:
https://research.bauforumstahl.de/fileadmin/user_upload/LOCAFI__Deliverable_D1.4_Software_OZone_UK.pdf

Pelastuslaki, (29.4.2011/379), Saatavissa:
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110379>

Paloposki, T. 2001. Urheiluhallien teräsrakenteiden lämpeneminen tulipalossa. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Tutkimusselostus nro. RTE3425/00.

Quintiere J, 2006. Fundamentals of fire phenomena. University of Maryland, USA: Wiley, (439) s. ISBN 978-0-470-09113-5

Rakennustieto OY, 2016. RT 10-11222 (6) s.

Rakennustieto OY, 2017. RT 10-11256 (4) s.

Ruukki, 2008. Suunnitteluohje, Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus. Saatavissa: <https://docplayer.fi/25549943-Rakenteiden-toiminnallinen-palomitoitus.html>

Salminen, M. & Hietaniemi, J, 2015. Performance-Based Fire Design of Steel Structures of Helsinki Olympic Stadium. Applications of Structural Fire Engineering, 15-16 October 2015, Dubrovnik, Croatia (6) s.

Salminen, M., Nieminen, M., & Malaska, M, 2019. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutus teräsrakenteiden palomitoitukseen. Rakenteiden Mekaniikka, 52(1), 23-37. (15) s. Saatavissa: <https://doi.org/10.23998/rm.74512>

SCI (The Steel Construction Institute), 2018. Design of columns subject to localised fires. Publication Number: SCI P423. Silwood Park, Ascot, Berkshire, UK: SCI, (52) s. Saatavissa: https://research.bauforumstahl.de/fileadmin/user_upload/LOCAFIplus_Design_Guide_UK.pdf

Suomen Standardoimisliitto SFS ry, 2018. Eurokoodit – Eurooppalaiset kantavien rakenteiden suunnittelustandardit [verkkodokumentti] Helsinki. Saatavissa: https://www.sfs.fi/files/309/eurokoodi_web.pdf

SFS-EN 1990+A1+AC, 2010. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Korvaa standardin SFS-EN 1990:2002 ja SFS-ENV 1991-1:1995. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+184 s.

SFS-EN 1991-1-2+AC, 2016. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden kuormitukset. 2. painos. Korvaa standardin SFS-EN 1991-1-2+AC:2004. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+102 s.

SFS-EN 1993-1-1, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-1:1993. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+99 s.

SFS-EN 1993-1-2, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-2:1996. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+75 s.

SFS-EN 1993-1-4, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-4: Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-4:1999. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+37 s.

SFS-EN 1993-1-12, 2009. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: EN 1993 laajennus teräslajeihin S700 asti. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+11 s.

SFS-EN 12845, 2015. Kiinteät palonsammutusjärjestelmät. Automaattiset sprinklerilaitteistot. Suunnittelu, asennus ja huolto. Korvaa standardin SFS-EN 12845 +A2:2009 Suomen standardoimisliitto SFS: 1+194 s

SFS-EN 1363-1, 2012. Fire resistance tests. Part 1: General requirements. Korvaa standardin SFS-ENV 1363-1:2000. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+52 s.

SSAB Europe, 2016. SSAB DOMEX TUBE Rakenneputket. EN 1993 Käsikirja. ISBN 978-952-93-7448-9 (PDF) Keuruu: SSAB Europe Oy, (688) s.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 2003. RIL 221-2003, Paloturvallisuussuunnittelu, Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Helsinki: RIL, (138) s. ISBN 951-758-433-4

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 2018. 195-1-2018 Rakenteellinen paloturvallisuus: yleiset perusteet ja ohjeet. Helsinki: RIL, (175) s. ISBN 978-951-758-637-5

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus (2017)
[verkkodokumentti] Helsinki: Ympäristöministeriön asetus rakennuksen

paloturvallisuudesta (848/2017). Saatavissa:

<https://www.ym.fi/download/noname/%7B66288BFB-A697-4FCB-B602-CE0316F2C37B%7D/134002>

Suomen rakentamismääräyskokoelma, 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Helsinki: Perustelumuistio. Saatavissa:

<https://www.ym.fi/download/noname/%7BDF1818E5-3C25-41CF-A439-24AC6C5ED57B%7D/132666>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus, Teräsrakenteet (2017) [verkkodokumentti] Helsinki: Ohje sisältää yhteen koottuna kaikki teräsrakenteiden suunnittelua koskevat kansalliset liitteet. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BD829E0A3-9D8E-4730-8E6C-EF076B4642F2%7D/126585>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus (2016) Helsinki: Ympäristöministeriön asetus 5/16, Palolle altistettujen rakenteiden rasituksia koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1991-1-2 [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.finlex.fi/data/normit/42810/asetus_5-16_2016.pdf

Teräsrakenneyhdistys ry TRY, 2000. TERÄSNORMIKORTTI N:o 13/2000, Teräksen materiaalimallit mitoittaessa palosuojaamattomia teräsrakenteita. Helsinki:

Teräsrakenneyhdistys ry, (18) s. Saatavissa:

<http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/237/2abe3cb/Normikortti13net.pdf>

Teräsrakenneyhdistys ry TRY, 2004. Oletettuun palonkehitykseen perustuva paloturvallisuussuunnittelu. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry, (74) s. ISBN 952-9683-27-8

Teräsrakenneyhdistys ry TRY, 2016. EN1993 revisiointi ja Eurocode päivitys. Saatavissa:

http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/586/d7f895b/Eurocode_nykytila.pdf

Teräsrakenneyhdistys ry TRY, 2017. Teräsrakenteiden palosuojamaalaus 2017.

Helsinki: TRY, (24) s. ISBN952-9683-33-2 Saatavissa:

http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/845/a5c28b8/palosuojamaalaus_2017_sahkoinen_versio.pdf

TKK arkkitehtiosasto, 2007. Teräs, perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Vammala: (88 s.)

ISBN 978-951-22-8651-5 Saatavissa:

http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf

Tampere University of Technology (TUT), 2017. LOCAFI+. Legal Context.

Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localized fire – Valorization 1.s.

University of Liege. SAFIR Capabilities and examples of applications, 2015. Liege, Belgia.

Hietaniemi J., 2007. Palon voimakkuuden

kuvaaminen toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa. Espoo: VTT, (148 s. + liitteet)

Kokki Esa, Oksanen Tuuli ja Tillander Kati 2009. Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. Helsinki: VTT (106 s. + liitt. 5 s) ISBN 978-951-38-7287-8. Saatavissa:

<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/t2479.pdf>

Wickström, U., Dutinh, D., McGrattan, K. 2007. "Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures". Proceedings of 11th international Interflam conference. London: (12) s.

Yu, H., Lee, J.L. & Kung, H.C. 1994. Suppression of Rack-Storage Fires by Water.

Teoksessa: Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium, International Association For Fire Safety Science. s. 901-912. Boston, USA: Factory Mutual Research Corporation (12) s.

Saatavissa: http://iafss.org/publications/fss/4/901/view/fss_4-901.pdf

LITTEET

Sprinklauksen huomioon ottaminen

Tarkasteltava aikaväli (t):

$$964 \text{ s} \leq t \leq 1800 \text{ s} \quad t := 964 \text{ s}, 965 \text{ s}..1800 \text{ s}$$

Sprinklauksen laukeamisaika (t_p): $t_p := 964 \text{ s}$

Paloteho sprinklauksen laukeamishetkellä $Q(t_p)$: $Q(t_p) := 3 \text{ MW}$

Vesivuon mitoitustiheys OH -
sprinkleriluokalle: $m_w := 5 \cdot \frac{l}{m^2 \cdot \min \cdot l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}$

Madrzykowski & Vettori (1992): $k_1 := 0.0023 \text{ s}^{-1}$

$$Q_1(t) := Q(t_p) \cdot \exp(-(k_1) \cdot (t - t_p))$$

Evans (1992): $k_2 := 0.33 \cdot (m_w)^{1.85} \text{ s}^{-1} = 0.0033268149 \frac{1}{\text{s}}$

$$Q_2(t) := Q(t_p) \cdot \exp(-(k_2) \cdot (t - t_p))$$

Yu (1994): $k_3 := (0.18 \cdot m_w - 0.013) \text{ s}^{-1} = 0.002 \frac{1}{\text{s}}$

$$Q_3(t) := Q(t_p) \cdot \exp(-(k_3) \cdot (t - t_p))$$

Hamins & McGrattan (1999): $k_4 := (0.19 \cdot m_w - 0.001) \text{ s}^{-1} = 0.0148 \frac{1}{\text{s}}$

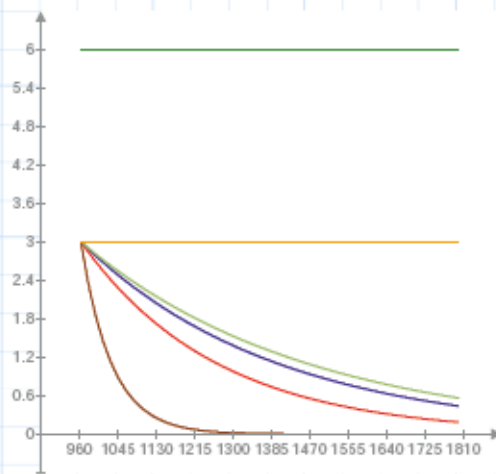
$$Q_4(t) := Q(t_p) \cdot \exp(-(k_4) \cdot (t - t_p))$$

Paloteho keskeytyy ja pysyy vakiona

$$Q_5(t) := Q(t_p)$$

Paloteho keskeytyy ja kaksinkertaistuu, minkä jälkeen pysyy vakiona

$$Q_6(t) := 2 \cdot Q(t_p)$$



t (s)



Q₁(t) (MW)

Q₂(t) (MW)

Q₃(t) (MW)

Q₄(t) (MW)

Q₅(t) (MW)

Q₆(t) (MW)